ÉNERGIE D'ADSORPTION DES IONS MINÉRAUX PAR LES COLLOÏDES DU SOL ET NUTRITION MINÉRALE DES PLANTES (1)

PAR

R. BLANCHET

Station centrale d'Agronomie, Versailles.

PREMIÈRE PARTIE

ÉNERGIES D'ADSORPTION DE DIVERS IONS PAR DES ARGILES PURES

PLAN DU MÉMOIRE

Introduction : Données physico-chimiques caractérisant les mouvements d'ions dans le sol.

L'adsorption. Réactions d'adsorption et de désorption.
Énergies partielles molaires.
Activités ioniques.
Vitesses de réactions. L'énergie d'activation.
Les mouvements d'ions, l'emploi des isotopes.

Énergies d'adsorption.

Cations.

Techniques expérimentales.
Désorption du potassium adsorbé par une kaolinite.
Interprétation énergétique.
Désorption du potassium adsorbé par une montmorillonite.
Conclusions.

Les ions phosphoriques.

Techniques expérimentales
Désorption et dilution isotopique des ions phosphoriques adsorbés par une kaolinite.
Désorption et dilution isotopique des ions phosphoriques adsorbés par une montmorillonite.
Conclusions.

(1) L'ensemble de ce travail est publié sous forme de trois mémoires successifs :
— Énergies d'adsorption de divers ions par des argiles pures ;
— Application des énergies d'adsorption à l'étude des sols ;
— Nutrition minérale des plantes, activités ioniques et énergies d'adsorption.

INTRODUCTION

La détermination des réserves nutritives minérales du sol a fait l'objet depuis un siècle environ d'un grand nombre de travaux. Les premiers expérimentateurs solubilisaient les éléments du sol par des acides concentrés, de façon à les extraire en totalité. Rapidement, on s'est aperçu que la fertilité réelle des terres ne correspondait guère aux résultats des dosages effectués ainsi : les plantes ne s'alimentent pas uniformément dans l'ensemble des réserves, mais à partir de formes particulièrement labiles. De nombreuses techniques ont été mises au point depuis, pour tâcher de séparer ces fractions les plus efficaces (1). Bien qu'elles rendent d'incontestables services dans la détermination des fumures, ces diverses méthodes conventionnelles et empiriques laissent subsister de larges marges d'indétermination, et ne peuvent s'appliquer à tous les types de sols.

Depuis quelques années, l'emploi des isotopes radioactifs et les études de chimie colloïdale ont permis de préciser les phénomènes intervenant dans le sol (2, 3, 4). Les progrès de la Physiologie Végétale mettent d'autre part en lumière les divers processus grâce auxquels s'effectue l'absorption des ions minéraux (5 à 26) : adsorption radiculaire, dépense d'énergie, rôle des transporteurs... On est donc maintenant en mesure de mieux comprendre les mouvements d'ions par lesquels se traduit la nutrition de la plante aux dépens des réserves du sol.

Le but de ce travail est d'éclaircir quelques-uns de ces mécanismes, avec l'aide de diverses données physico-chimiques, afin de préciser les conditions d'une alimentation satisfaisante.

DONNÉES PHYSICO-CHIMIQUES CARACTÉRISANT LES MOUVEMENTS D'IONS DANS LE SOL

Un agrégat de sol humide, ou plus généralement une suspension de sol, représente un système en équilibre dans lequel les ions se répartissent entre deux phases : la phase solide adsorbante et la phase liquide ou « solution du sol ». Il s'agit d'un équilibre statistique, chacun des ions « passant une partie de son temps dans chacune des phases » (G. BARBIER), ainsi que le montre l'emploi des isotopes. Ces mouvements individuels d'ions se compensent entre eux, et, pour un rapport sol/eau donné, à une température déterminée, la composition globale de chacune des phases reste constante. Elle est fonction des activités que possèdent dans ce système les diverses espèces ioniques, c'est-à-dire de leur « tendance à l'échappement ». Schématiquement, les ions sont plus condensés

sur la phase solide, mais ils sont moins libres que dans la solution, et la tendance à l'échappement est la même dans les deux phases (voir, sur les équilibres ioniques existant dans le sol, réf. 27 à 57).

L'équilibre est rompu lorsque la plante absorbe des ions aux dépens de la solution. Pour établir l'égalité des activités, des ions doivent se désorber. La rupture des liaisons d'adsorption exige un apport d'énergie, variable selon la nature des ions et celle des colloïdes adsorbants. On peut tenter d'évaluer ces apports d'énergie à l'aide de diverses données physico-chimiques.

1. L'adsorption.

L'adsorption des corps dissous est une réaction de surface, caractérisée par une fixation réversible, à la surface d'une phase solide, de molécules dissoutes dans une phase liquide (58, 59). Lorsque l'adsorbant et le corps adsorbé possèdent des charges de signes contraires, l'adsorption est dite « polaire », et, plus généralement, s'il s'agit de réactions ioniques, « adsorption d'échange » (60). Ce terme implique que l'adsorbant possède, par exemple, des charges négatives, compensées en surface par des ions positifs adsorbés. Lorsque l'ensemble est placé dans une solution saline, les cations primitivement fixés s'échangent contre ceux de la solution, le phénomène constituant l'adsorption d'échange.

Tel est le cas des argiles, et de façon générale du complexe colloïdal des sols, qui se comportent comme de gros anions retenant par adsorption des cations susceptibles d'échange. C'est également celui des échangeurs d'ions (résines synthétiques, permutites).

Dans certaines limites, les lois de l'adsorption s'appliquent à cette adsorption d'échange (lois de FREUNDLICH et de LANGMUIR).

Le calcul du volume représenté par les cations fixés sur des argiles (Ca^{++} par exemple), en les admettant hydratés, indique qu'ils ne sont pas adsorbés en couches monomoléculaires, mais selon plusieurs couches. Cela s'explique par l'intensité suffisamment grande des attractions électrostatiques, susceptibles de s'exercer à une certaine distance (61). Dans de larges limites, la dimension des cations fixés n'influe pas sur la capacité d'échange de l'argile (62).

Les cations adsorbés ainsi étant soumis à l'agitation thermique, il est peu probable qu'ils restent en couches compactes autour de la particule d'argile. On estime plutôt qu'il se forme une couche double diffuse, comparable aux modèles de STERN ou de GOUY (61, 63, 64).

2. Réactions d'adsorption et de désorption.

La liaison d'adsorption est un cas particulier de la liaison chimique. Elle peut être réalisée par des mécanismes très divers : covalence, liaisons

ioniques, forces de Van der Waals. Les énergies mises en jeu sont donc également très variables (59, 73). Dans l'adsorption polaire qui intervient entre les ions et les colloïdes du sol, il se constitue essentiellement des liaisons ioniques.

On peut caractériser la formation et la rupture de ces liaisons par les données habituelles de la Thermodynamique chimique. Les principales caractéristiques énergétiques des réactions d'adsorption et de désorption sont ainsi, à pression constante (74, 75) :

— la variation d'enthalpie ΔH, ou chaleur de réaction à pression constante ;

— la variation d'enthalpie libre (énergie libre de GIBBS) ΔG ;

— la variation d'entropie ΔS.

Ces trois fonctions sont reliées entre elles (définition de l'enthalpie libre) par :

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \qquad (T = \text{Température absolue}).$$

La chaleur de réaction ΔH représente la somme de deux termes : l'un ΔG, est l'énergie « libre », transformable en travail extérieur si la réaction est effectuée dans des conditions très voisines de la réversibilité ; l'autre ΔS, est une énergie « liée » qui ne peut être transformée en travail, mais uniquement en chaleur (dégagement ou absorption selon le signe).

La réaction est spontanée si ΔG est négatif (diminution de l'énergie libre, réaction exergonique) ; si ΔG est positif, il faut fournir de l'énergie pour que la réaction s'effectue (réaction endergonique). La valeur de ΔG représente l'affinité des corps entrant en réaction, dans les conditions où celle-ci s'effectue.

La réaction est dite exothermique si ΔH est négatif, endothermique dans le cas contraire. Mais, en raison de l'intervention du terme entropique $T\Delta S$, le fait qu'une réaction soit exothermique n'implique pas qu'elle puisse se produire spontanément, cela dépend uniquement du signe de ΔG. La variation d'entropie ΔS représente, en quelque sorte, l'augmentation ou la diminution du désordre au cours de la réaction, l'entropie étant fonction du nombre de possibilités d'arrangements que peut présenter un système, dans un état énergétique donné.

Les valeurs de ΔG, ΔH, ΔS sont dites « standard » ou « normales » quand la réaction est effectuée dans des conditions telles que tous les corps réagissants se trouvent à l'activité unité. Elles sont alors affectées d'un indice : ΔG^o, ΔH^o, ΔS^o. Représentant l'affinité des corps réagissant dans des conditions bien déterminées, elles permettent de mieux comparer différents systèmes les uns par rapport aux autres. Lorsque la réaction est effectuée dans des conditions quelconques, les valeurs trouvées pour ΔG, ΔH et ΔS s'écartent des valeurs standard.

Quelques déterminations de ces valeurs standard ΔG^o, ΔH^o, ΔS^o ont été effectuées pour des réactions d'échange d'ions dans les sols (76) : ΔH^o a été trouvé sensiblement nul pour les échanges Ca^{++}-NH_4^+, Ca^{++}-K^+, K^+-NH_4^+. Les valeurs de ΔG^o ont été trouvées faibles et négatives dans l'échange de Ca^{++} contre NH_4^+ et dans l'échange de K^+ contre NH_4^+ (colloïdes NH_4, dans lesquels NH_4^+ est remplacé par Ca^{++} ou K^+). Les valeurs de ΔS^o sont faibles et positives (augmentation de la stabilité du système par adsorption de Ca^{++} ou K^+). Ces mesures permettent de préciser les constatations expérimentales, qu'il est difficile de chiffrer autrement, et de mieux comprendre les phénomènes réels.

3. Énergies partielles molaires.

Dans un système renfermant plusieurs espèces chimiques, on peut considérer séparément l'enthalpie ou chaleur totale, l'enthalpie libre et l'entropie de chacun des constituants (74, 75). Considérons par exemple l'enthalpie libre de ce système (énergie libre de Gibbs).

Chacun des constituants i, est caractérisé par :

— Une quantité présente dans le système, c'est-à-dire le nombre n_i de moles de l'espèce chimique i.

— L'enthalpie libre $\overline{G}$ que possède, par mole, ce constituant i.

Le produit $n_i\,G_i$ est l'enthalpie libre partielle de l'espèce i. L'enthalpie libre de l'ensemble du système est :

$$G = \Sigma n_i \overline{G}_i = n_1\overline{G}_1 + n_2\overline{G}_2 + n_3\overline{G}_3 + \cdots$$

$\overline{G}_1$, $\overline{G}_2$, $\overline{G}_3$ sont les enthalpies libres partielles par mole, ou enthalpies libres partielles molaires, des constituants 1, 2, 3 ; n_1, n_2, n_3, sont les nombres de moles de chacun de ces constituants. $\overline{G}$ représente un niveau énergétique (facteur d'intensité) et n une quantité d'espèce chimique présente dans le système (facteur de capacité).

On peut raisonner de la même façon sur les valeurs $\overline{H}$ et $\overline{S}$. Dans l'application de ces données aux substances dissoutes, on considère plutôt des enthalpies relatives à un état de référence, et définies par

$$\overline{L} = \overline{H} - \overline{H}_0,$$

$\overline{H}_0$ étant l'enthalpie partielle du corps dissous à la dilution infinie. $\overline{L}$ représente la différence entre les enthalpies que possède le corps à la dilution infinie et dans le système considéré.

De même que pour les valeurs « totales », l'enthalpie, l'enthalpie libre et l'entropie partielles molaires sont reliées par :

$$\overline{H} = \overline{G} + T\overline{S}.$$

4. Activités ioniques.

De même que la notion de fugacité permet de généraliser aux gaz réels les lois des gaz parfaits, la notion d'activité se substitue à celle de concentration des ions en solution, afin de mieux rendre compte de leurs propriétés. La théorie des interactions ioniques, formulée en 1923 par DEBYE et HÜCKEL, puis complétée par d'autres auteurs, a précisé les concepts de force ionique et de coefficients d'activité ioniques (65, 66, 67). Dans une solution relativement concentrée, les ions sont moins « libres » que dans une solution infiniment diluée, et leurs propriétés sont, en quelque sorte, amoindries.

L'activité est définie à partir de l'enthalpie libre partielle molaire ou du potentiel chimique, par rapport à un état standard arbitraire (67, 68). Comme leurs noms l'indiquent, ces deux grandeurs caractérisent le potentiel de l'espèce ionique envisagée, dans le milieu considéré. Elles ont habituellement la même signification, mais, dans le cas de l'adsorption polaire, une interprétation particulière du potentiel chimique a été donnée (69). L'activité s'en déduit ainsi :

$$\overline{G}_i - \overline{G}_i^0 = RT \ln a_i$$

ou

$$\mu_i - \mu_i^0 = RT \ln a_i'.$$

$\overline{G}_i$: enthalpie libre partielle molaire de l'espèce ionique i (énergie libre de Gibbs).

$\overline{G}_i^0$: enthalpie libre partielle molaire dans l'état standard.

R : constante des gaz.

T : température absolue.

$\ln a$: logarithme népérien de l'activité.

μ_i : potentiel chimique.

μ_i^0 : potentiel chimique dans l'état standard.

Pour les ions en solution, l'état standard de référence généralement adopté est celui dans lequel l'activité se confond avec la concentration, à la dilution infinie. Dans deux solutions où une même espèce ionique se trouve à deux activités différentes, les différences d'enthalpies libres partielles molaires et de potentiels chimiques sont uniquement fonction de la différence d'activité, si l'on conserve le même état de référence :

$$\overline{G}_{i_I} - \overline{G}_{i_{II}} = RT \ln \frac{a_{i_I}}{a_{i_{II}}}.$$

(De même pour les potentiels chimiques).

On relie l'activité a à la concentration molaire m par un coefficient d'activité γ tel que :

$$\gamma = \frac{a}{m}.$$

L'écart par rapport à l'unité du coefficient γ représente la somme des interactions ioniques qui se manifestent dans une solution non infiniment diluée. Ce coefficient est fonction de la force ionique μ, que l'on définit par :

$$\mu = \frac{1}{2}\Sigma m_i Z_i^2$$

m_i et Z^i étant respectivement la concentration molaire et la valence des ions d'espèce i. Dans les solutions suffisamment diluées ($\mu < 0{,}02$) le coefficient d'activité γ est tiré de la force ionique μ par la relation :

$$\log \gamma = -0{,}5\, Z_i^2 \sqrt{\mu}.$$

Dans les solutions plus concentrées, il faut tenir compte en outre du rayon ionique. Si l'on connaît les concentrations molaires des diverses espèces ioniques contenues dans une solution, on peut donc calculer leurs activités.

Les activités peuvent également être déterminées directement, notamment par des mesures électrométriques. Si deux électrodes sont plongées dans deux cellules où deux solutions de la même espèce ionique se trouvent à des activités différentes, les cellules étant séparées par une membrane perméable à ces seuls ions, il s'établit une force électromotrice E de la forme :

$$E = \frac{RT}{n\mathcal{F}} \ln \frac{a_1}{a_2} \qquad \begin{cases} n : \text{valence de l'ion} \\ \mathcal{F} : \text{Faraday.} \end{cases}$$

Si a_1 est connue, on peut ainsi déterminer a_2.

Dans le cas des mélanges d'ions, l'interprétation est plus difficile (70). Des essais de mesures d'activités ont été effectués par cette technique sur des suspensions d'argiles ou de sols (71). Les résultats ne sont malheureusement pas sûrs, car ces mesures sont probablement faussées par les chocs de particules en suspension sur les électrodes. Cet inconvénient apparaît d'ailleurs dans les mesures de pH des mêmes suspensions.

5. Vitesse des réactions. L'énergie d'activation.

Les réactions d'échanges d'ions sur les colloïdes du sol sont parfois lentes, notamment en ce qui concerne les ions phosphoriques. On admet que les réactions chimiques ne s'effectuent qu'entre des molécules activées, c'est-à-dire ayant emmagasiné suffisamment d'énergie pour que les liaisons existantes soient fortement relâchées, et faciles à rompre (77). L'activation est un phénomène statistique : à tout instant, une fraction des molécules contenues dans un système est activée, puis redevient normale pendant que d'autres s'activent, etc. L'acquisition de cette énergie, grâce aux chocs des particules entre elles, n'est généralement pas instantanée. Ce facteur de temps, qui conditionne l'activation des

corps réagissants, détermine la vitesse de la réaction. Plus la température est élevée, plus la proportion de molécules activées est grande, et plus la réaction est rapide. L'adsorption, comme les autres réactions chimiques, obéit à ces lois (58, 59).

L'énergie nécessaire à l'activation peut être déduite de la constante de vitesse d'une réaction. Quoique cette donnée soit intéressante dans l'étude des échanges d'ions sur les colloïdes du sol, très peu de déterminations semblent avoir été faites jusqu'ici. Les difficultés rencontrées dans ces recherches sont souvent assez grandes.

6. Les mouvements d'ions, l'emploi des isotopes.

Dans la théorie de LANGMUIR, l'adsorption est traitée comme un phénomène réversible, et l'équilibre est défini par la résultante de deux réactions opposées dont la vitesse est égale : adsorption, c'est-à-dire fixation sur la phase solide, d'une part ; désorption, mécanisme inverse, d'autre part. D'après cette théorie, les molécules ou les ions que renferme un système dans lequel règne un équilibre d'adsorption se trouvent tantôt dans la phase solide, tantôt dans la phase liquide.

C'est bien ce que l'on observe sur les colloïdes du sol par l'emploi des isotopes (2, 46, 48, 78). Si l'on ajoute à une suspension de sol une petite quantité d'ions radioactifs, par exemple des ions phosphoriques, on constate qu'ils disparaissent peu à peu de la solution pour se fixer sur la phase solide. Lorsque l'équilibre de distribution est atteint, c'est-à-dire lorsque la quantité d'ions radioactifs restant en solution ne varie plus, le rapport $^{31}P/^{32}P$ dans la solution est égal au rapport $^{31}P/^{32}P$ dans la masse d'ions phosphoriques du sol susceptible de passer dans la solution. Cette masse est appelée « phosphore isotopiquement diluable », ou « autoéchangeable » ; le phénomène est nommé « dilution isotopique ». La quantité phosphore isotopiquement diluée à l'équilibre est donnée par la relati :

$$\frac{\text{P isotopiquement dilué}}{\text{P en solution}} = \frac{\text{Radioactivité totale introduite}}{\text{Radioactivité restant en solution}}.$$

Des essais de même principe ont été réalisés en cultivant des plantes dans des sols ayant reçu de petites quantités d'ions $^{32}PO_4$. Après la récolte des plantes, les dosages de ^{31}P et de ^{32}P sont effectués, indiquant les quantités respectivement absorbées. Connaissant la quantité de ^{32}P introduite dans le sol, et les quantités de ^{32}P et de ^{31}P absorbées, on en déduit la quantité totale L de ^{31}P du sol à partir de laquelle les plantes se sont alimentées :

$$\frac{L}{^{31}P \text{ absorbé}} = \frac{^{32}P \text{ introduit}}{^{32}P \text{ absorbé}}.$$

ANNALES
DE
L'INSTITUT NATIONAL
DE LA
RECHERCHE AGRONOMIQUE

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE

ANNALES DE L'INSTITUT NATIONAL

DE LA

RECHERCHE AGRONOMIQUE

SÉRIE A

ANNALES AGRONOMIQUES

SCIENCE DU SOL - FERTILISATION - BIOCLIMATOLOGIE
PHYSIOLOGIE VÉGÉTALE

Année 1959

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
7, rue Keppler – Paris

On avait espéré que ces travaux permettraient de définir sur des bases solides la richesse phosphorique des sols. Les résultats n'ont pas confirmé ces espérances : si, dans un même sol, l'absorption de P par les plantes est bien proportionnelle à la quantité de P isotopiquement diluable ou à la valeur de L, ni l'une ni l'autre ne peuvent servir à comparer des sols de types différents (50). Cela semble dû à ce que ces méthodes ne déterminent qu'un stock d'ions phosphoriques, sans tenir compte de leur activité.

Les techniques isotopiques ont été également appliquées aux cations. La dilution isotopique des fractions échangeables est très rapide ; celle du potassium rétrogradé est au contraire très lente (49). Dans le cas des ions phosphoriques, la vitesse des transferts chimiques (désorption) semble bien être égale à la vitesse des échanges isotopiques (79).

ÉNERGIES D'ADSORPTION

Le sol représente un matériau très complexe, dans lequel se superposent les propriétés des divers colloïdes, argile, humus et hydroxydes métalliques. En outre, il renferme des matières organiques en cours d'évolution, susceptibles de libérer pendant la durée des expériences des quantités non négligeables d'ions minéraux, surtout sous l'effet d'une élévation de température. Aussi, il nous a semblé préférable d'étudier tout d'abord l'énergétique de l'adsorption et de la désorption de ces ions sur des argiles pures, dans des conditions aussi voisines que possible de celles que l'on rencontre dans les sols (nature des ions, degré de saturation des argiles, force ionique...). L'extension aux sols des résultats obtenus ainsi sera examinée ensuite, ainsi que leur application à la nutrition minérale des plantes.

A. — CATIONS

I. — Techniques expérimentales.

1° **Préparation des suspensions d'argile.** — L'argile que l'on trouve dans les sols est généralement un mélange de divers types minéralogiques, qu'il est à peu près impossible de séparer, et dont les propriétés sont assez différentes. Nous avons plutôt utilisé deux de ces types purs, une kaolinite et une montmorillonite extraites de carrières. La kaolinite possède la structure classique ; la montmorillonite, provenant de Camp-Bertaux (Maroc), a été décrite par divers auteurs (80).

Ces argiles brutes sont traitées par l'acide chlorhydrique 0,2 N jusqu'à élimination des cations adsorbés, puis lavées à l'eau pour enlever HCl. Elles sont ensuite mises en suspension dans l'eau, et dispersées par agitation en milieu alcalin (pH 9,5, obtenu par addition de NaOH). La

séparation des particules de diamètre inférieur à 2 μ est effectuée en laissant sédimenter, par application de la loi de STOCKES. La suspension ainsi obtenue est floculée par l'acide chlorhydrique, l'argile recueillie est lavée jusqu'à élimination de Cl, et remise en suspension dans un faible volume d'eau. Le pH de ces suspensions est de 3,3 pour la montmorillonite, 4,7 pour la kaolinite.

2° **Adsorption des cations.** — L'adsorption des cations est effectuée en ajoutant à la suspension une quantité suffisante de la base correspondante, de façon à obtenir un pH compris entre 7,5 et 8, en présence d'une solution 0,02 N d'un sel neutre. L'addition de ce sel a pour but de maintenir dans la suspension une force ionique comparable à celle des solutions du sol. Les acétates d'ammonium et de calcium sont utilisés, afin d'obtenir, au voisinage de la neutralité, un pouvoir tampon suffisant.

Les quantités de bases apportées correspondent, pour la montmorillonite, à 100 milliéquivalents pour 100 grammes d'argile,et, pour la kaolinite, à 10 milliéquivalents pour 100 grammes (ordres de grandeurs des capacités d'échange de cations). Les suspensions, amenées à volumes connus, sont ensuite abandonnées pendant une semaine, afin que l'équilibre s'établisse.

Dans ces conditions, l'argile adsorbe une partie des cations apportés sous forme de base, et une partie des cations apportés sous forme de sel. On détermine les quantités adsorbées en mesurant leurs concentrations dans les solutions à l'équilibre.

3° **Désorption des cations.** — La désorption est réalisée en plaçant des quantités constantes d'argile dans des volumes croissants d'une même solution saline en équilibre avec l'adsorbant. Le pH et la concentration en cations de la solution en équilibre à la fin de l'adsorption sont connus. Une solution de même concentration en l'un des cations est préparée à partir de l'acétate correspondant, et amenée au même pH. Puis des volumes égaux de la suspension d'argile sont placés dans des volumes croissants de cette dernière solution.

Ainsi, pour la kaolinite ayant adsorbé K et Ca en milieu acétate Ca, l'argile K-Ca est en équilibre avec une solution renfermant x mg/l Ca et y mg/l K, à un pH donné. Cette suspension est placée au contact de volumes croissants de solution renfermant x mg/l Ca, dépourvue de K, et de même pH. L'augmentation du volume de la solution provoque une rupture d'équilibre par diminution de la concentration en K de la solution. L'équilibre se rétablit par désorption d'ions K^+ fixés par l'argile.

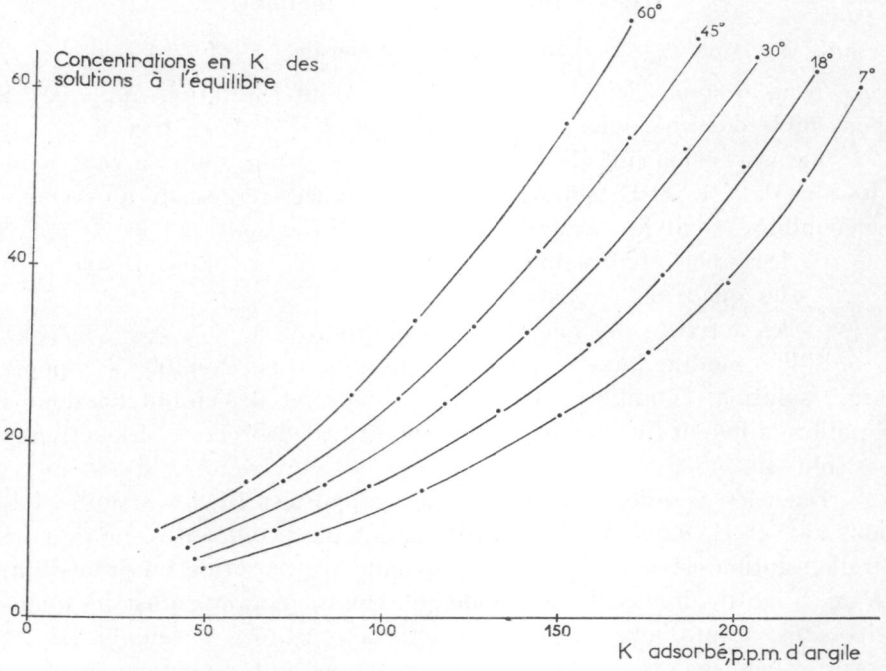
On dose le potassium dans cette solution ; connaissant la quantité totale introduite, on en déduit la quantité restant adsorbée.

Les désorptions sont réalisées à différentes températures bien déterminées. Cette technique permet de réaliser une désorption progressive

du potassium, dans une solution de force ionique constante ((Ca^{++}) étant grand par rapport à (K^{+})). Ce sont des conditions assez comparables à celles qui interviennent lorsque la plante s'alimente en potassium dans le sol, en présence d'un large excès de calcium.

II. — Désorption du potassium adsorbé par une kaolinite.

La désorption a été effectuée comme il est indiqué dans l'exemple ci-dessus. Après adsorption du potassium, la solution en équilibre avec l'argile contenait, à 18°C, 62,2 µg K par cm³, et 334 µg Ca. Le pH était 7,9. La suspension contenait 104 mg d'argile par cm³, concentration limite au-delà de laquelle se manifestent de nettes interactions entre les particules, altérant les propriétés adsorbantes. Le potassium adsorbé représentait 224 parties par million d'argile (p. p. m.).



GRAPHIQUE 1. — Isothermes d'adsorption du potassium par la kaolinite.

Des prises d'essais de 10 cm³ de cette suspension ont été additionnées des volumes suivants d'une solution d'acétate de calcium contenant, à pH 7,9, 334 µg Ca par cm³ : 0 ; 2,5 ; 7 ; 12 ; 20 ; 40 ; 70 ; 140 cm³. Ces suspensions diluées étaient placées au thermostat et agitées périodiquement jusqu'à obtention de l'équilibre. Celui-ci est très largement atteint en deux heures. Après filtration des suspensions, le dosage du potassium en solution était effectué par photométrie de flamme. De la concentra-

tion de la solution, on déduit la quantité restant adsorbée, en effectuant le calcul indiqué précédemment.

Le graphique 1 représente les résultats obtenus à diverses températures : 7°, 18°, 30°, 45° et 60°C. Les concentrations en potassium des solutions à l'équilibre sont portées en fonction des quantités de potassium restant adsorbées. On obtient une famille de courbes, chacune d'elles représentant une isotherme d'adsorption : à une température déterminée, la quantité adsorbée est une fonction bien définie de la concentration de la solution en équilibre. Une quantité adsorbée donnée est en équilibre avec des solutions d'autant plus concentrées que la température est plus élevée. L'augmentation de la température diminue l'adsorption, ce qui indique une réaction exothermique. Dans d'assez larges limites, l'adsorption obéit à la loi de LANGMUIR.

III. — Interprétation énergétique.

1° Interprétation générale.

Nous donnons ici, de façon détaillée, l'interprétation appliquée à l'ensemble des phénomènes d'adsorption étudiés dans ce travail.

La suspension initiale d'argile (Ca-K) dans une solution contenant des ions Ca^{++}, K^{+} et H^{+} à des activités déterminées représente un système en équilibre, dont les caractéristiques essentielles sont :

— le rapport argile/solution (quantité d'argile et volume de solution);

— les quantités d'ions adsorbés ;

— les activités des ions dans la solution.

Si l'on modifie l'une de ces caractéristiques, par exemple, le rapport argile/solution, l'équilibre existant est rompu, et il s'établit un nouvel équilibre différent du premier par les quantités adsorbées et les activités en solution.

Dans les expériences de désorption rapportées ici, les activités des ions Ca^{++} et H^{+} dans la solution sont maintenues constantes. Le rapport argile/solution est modifié, ce qui provoque la désorption du potassium. A une quantité donnée d'argile et de potassium, on ajoute ainsi des quantités croissantes d'ions Ca^{++} et H^{+}, à activité constante de ceux-ci. La désorption peut également être obtenue en augmentant, à volume constant, la con centration en ions Ca^{++} ou H^{+}.

Dans les deux cas, la désorption est obtenue grâce à un apport d'énergie libre au système. D'après la définition des enthalpies libres partielles molaires :

$$G = n_1\overline{G}_1 + n_2\overline{G}_2 + \cdots$$

G : enthalpie libre du système ;

$\overline{G}_1$, $\overline{G}_2$: enthalpie libre partielle molaire des constituants 1, 2... ;

n_1, n_2... : nombre de moles de ces constituants ;

on augmente, dans le premier cas, les nombres n de moles de Ca^{++} et H^+ sans modifier les $\overline{G}$. Dans le second cas, on augmente à la fois $\overline{G}$ et n. Il faut augmenter l'enthalpie libre partielle des ions Ca^{++} ou H^+ par rapport à celle des ions K^+ pour obtenir la désorption de ceux-ci et leur remplacement, sur le colloïde, par des ions Ca^{++} ou H^+. Nous avons adopté le premier mode de désorption, car il permet de travailler à force ionique constante. Dans ces conditions, le coefficient d'activité γ des ions K^+ est le même dans toutes les solutions. Ainsi, les variations de concentrations indiquent, à un facteur proportionnel près, les variations d'activités, et les rapports de concentrations sont égaux aux rapports d'activités :

$$\frac{a}{a'} = \frac{c\gamma}{c'\gamma} = \frac{c}{c'}. \qquad (I)$$

D'après la définition de l'activité :

$$\overline{G} - \overline{G}' = RT \ln \frac{a}{a'} \qquad (II)$$

à toute variation de l'activité des ions K^+ correspond une variation de leur enthalpie libre partielle molaire. L'enthalpie libre partielle molaire $\overline{G}$ est d'autre part reliée à l'enthalpie partielle molaire $\overline{L}$ et à l'entropie partielle molaire $\overline{S}$ par l'équation de GIBBS-HELMHOLTZ appliquée aux quantités partielles molaires, soit, pour les réactions à pression constante (74, 75) :

$$\left[\frac{d(\Delta\overline{G}_1)}{dT}\right]_{n_1,\, n_2,\, \ldots} = \frac{\Delta\overline{G}_1 - \Delta\overline{L}_1}{T} = -\Delta\overline{S}_1. \qquad (III)$$

Les indices n_1, n_2... signifient que les nombres de moles des constituants 1, 2, ... doivent être constants, dans le système, quand $\overline{G}$ varie sous l'effet de la température.

Cette relation devient ici (74) :

$$\frac{d \ln a}{dT} = \frac{-\Delta\overline{L}}{RT^2}. \qquad (IV)$$

D'autre part :

$$\Delta\overline{G} = \Delta\overline{L} - T\Delta\overline{S}. \qquad (V)$$

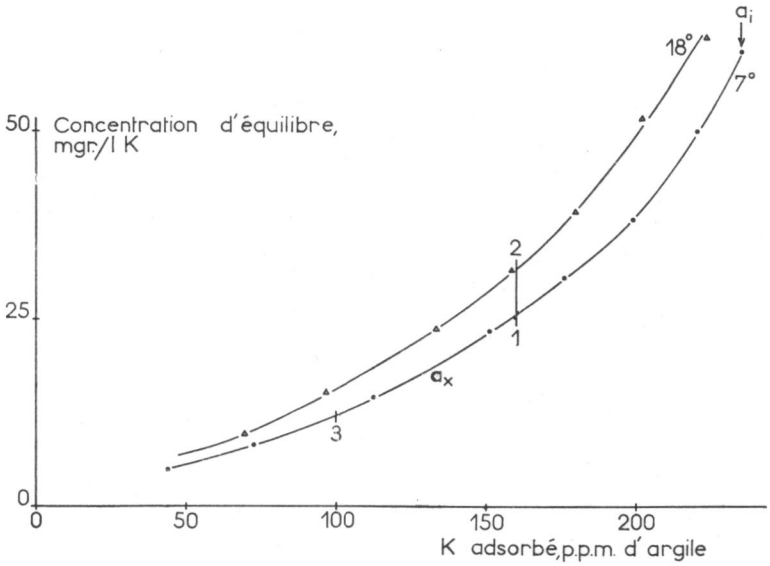
Ces relations peuvent être appliquées à l'adsorption des ions K^+. L'influence de la température sur les activités à l'équilibre indique la variation d'enthalpie partielle molaire qui accompagne l'adsorption, c'est-à-dire la chaleur d'adsorption. Toutefois, l'activité varie considérablement selon la quantité adsorbée (graphique 2) ; l'enthalpie et l'entropie d'adsorption peuvent varier également. Pour que le calcul soit légitime, il faut isoler, dans $\frac{d(\Delta\overline{G})}{dT}$, l'influence de la température,

en considérant les activités dans les solutions en équilibre, à deux températures, avec la même quantité adsorbée. Dans ces conditions, l'indice n_1, se rapportant aux ions K^+, est constant, ainsi que n_2, n_3...

Nous n'envisageons pas ici l'énergétique de l'ensemble de la réaction d'échange :

$$\text{argile K} + Ca^{++} \rightleftarrows \text{argile-Ca} + 2\ K^+$$

mais uniquement le comportement des ions K^+, afin de mesurer leurs énergies d'adsorption dans différentes conditions, en faisant appel aux quantités partielles molaires.



GRAPHIQUE 2. — Schéma de l'interprétation énergétique. — Calcul de $\Delta\bar{L}$, $\Delta\bar{S}$ et $\Delta\bar{G}$.

Considérons le graphique 2, où sont représentées deux isothermes d'adsorption du potassium, obtenues à 7° et 18°C. Soit une quantité adsorbée donnée, par exemple 160 p.p.m.. A 7°, la concentration d'équilibre, dans ce milieu, est de 2,55 mg K par litre ; à 18°, elle est de 31,5 mg par litre. Ainsi, une même quantité de K adsorbée est en équilibre, à 7°, avec une concentration de 25,5 mg K par litre (état 1), et, à 18°, avec une concentration de 31,5 mg par litre (état 2). La quantité totale de K contenue dans les deux systèmes est la même, ainsi que la quantité adsorbée. Si l'on connaît les activités des ions K^+ correspondant à chacun de ces deux états, on peut calculer la chaleur d'adsorption des ions K^+, c'est-à-dire la variation $\Delta\bar{L}$, d'enthalpie partielle molaire, pour ce degré déterminé de saturation de l'adsorbant, à l'aide de la relation (III) :

$$\Delta\bar{L} = -RT^2 \frac{d \ln a}{dT} = \frac{-RT^2}{T_1 - T_2} \ln \frac{a_1}{a_2}. \qquad \text{(VI)}$$

Or, dans cette solution de force ionique constante, le rapport des activités se confond avec le rapport des concentrations (I); pour effectuer le calcul, il est inutile de calculer le coefficient d'activité :

$$\Delta\bar{L} = \frac{-RT^2}{T_1 - T_2} \ln \frac{c_1}{c_2}. \qquad \text{(VII)}$$

De la même relation (III) de GIBBS-HELMHOLTZ, on peut également tirer la valeur de $\Delta\bar{S}$, variation d'entropie partielle molaire intervenant au cours de l'adsorption des ions K^+ :

$$\frac{d(\Delta\bar{G})}{dT} = -\Delta\bar{S}. \qquad \text{(VIII)}$$

Par définition, la variation de l'activité correspond en effet à la variation de l'enthalpie libre partielle molaire $\bar{G}$. Ainsi :

$$d(\Delta\bar{G}) = d(RT \ln a) = RT \ln \frac{a_1}{a_2} = RT \ln \frac{c_1}{c_2} \qquad \text{(IX)}$$

et :

$$\Delta\bar{S} = \frac{-RT}{T_1 - T_2} \ln \frac{c_1}{c_2}. \qquad \text{(X)}$$

Le terme $(T\Delta\bar{S})$ de (V) est ainsi :

$$T\Delta\bar{S} = \frac{-RT^2}{T_1 - T_2} \ln \frac{c_1}{c_2}. \qquad \text{(XI)}$$

Si l'on compare (VIII) et XI), on constate que les deux termes $\Delta\bar{L}$ et $T\Delta\bar{S}$ ont la même valeur absolue. D'après le graphique 2, c_1 est plus petit que c_2, et T_1 est inférieur à T_2. $\Delta\bar{L}$ est négatif, la réaction d'adsorption est exothermique. $\Delta\bar{S}$ est également négatif, l'entropie des ions K^+ diminue lorsqu'ils s'adsorbent, comme l'on pouvait s'y attendre. Les termes $\Delta\bar{L}$ et $T\Delta\bar{S}$ sont donc algébriquement égaux. En les reportant dans (V), qui s'applique à une seule température, et à la condition, vérifiée ici, que $\Delta\bar{L}$ et $\Delta\bar{S}$ varient peu avec T :

$$\Delta\bar{G} = \Delta\bar{L} - T\Delta\bar{S}$$

il apparaît :

$$\Delta\bar{G} = 0.$$

La variation d'enthalpie libre partielle molaire est nulle, à une température déterminée, quand on considère un point de la courbe de désorption, c'est-à-dire une variation infiniment petite de la quantité adsorbée. Il en est de même pour un point quelconque de la courbe. Cela résulte du fait que le système est en équilibre, la caractéristique de tels systèmes étant : $\Delta\bar{G} = 0$. Toutefois, cette conclusion n'est valable que si l'on considère une portion infiniment petite de l'isotherme d'adsorption :

à une variation finie de la quantité adsorbée correspond une variation finie de l'activité des ions K^+ dans la solution en équilibre, donc une variation de leur enthalpie libre partiel le molaire, et $\Delta\overline{G}$ ne peut être nul.

Considérons maintenant l'ensemble de l'isotherme. Au fur et à mesure de la désorption, l'activité des ions K^+ dans la solution en équilibre diminue ; il en est donc de même de leur enthalpie libre partielle molaire. Cela implique que les ions sont de plus en plus fortement retenus par le colloïde. Entre deux points de la courbe, par exemple entre les points 1 et 3, il est facile de calculer la variation d'enthalpie libre partielle molaire qui intervient entre les deux stades de la désorption : elle est proportionnelle au rapport des activités, ou des concentrations d'équilibre :

$$\Delta\overline{G} = RT \ln \frac{c_1}{c_3}.$$

C'est l'énergie nécessaire pour concentrer les ions K^+ depuis la concentration c_3 jusqu'à la concentration c_1, énergie qu'il faudrait fournir si l'on voulait désorber les ions K^+, à une température donnée, à la concentration c_1 plutôt qu'à la concentration c_3 (en admettant, ce qui semble hautement probable, que les *variations* d'enthalpie libre partielle molaire sont égales dans la phase adsorbante et dans la phase solution). Si la désorption de quantités infiniment petites d'ions K^+ s'effectue, dans des conditions d'équilibre, sans apport extérieur d'énergie ($\Delta\overline{G} = 0$), il n'en est pas de même lorsque l'on envisage la désorption, à une activité donnée a_i, de l'ensemble des ions K^+ retenus par le colloïde. Il faudrait pour cela augmenter l'enthalpie libre partielle molaire des ions qui, dans des conditions d'équilibre, se désorberaient à l'activité a_x, d'une quantité telle que :

$$\Delta\overline{G} = RT \ln \frac{a_i}{a_x}.$$

Si a_i désigne l'activité des ions K^+ dans la suspension initiale non diluée, et a_x l'activité à laquelle se désorbent au cours de la dilution les ions fixés (des points quelconques de la courbe de désorption), le travail $\Delta\overline{G} = RT \ln \frac{a_i}{a_x}$ est celui qu' il faudrait fournir pour obtenir à l'activité a_i la désorption des ions qui se désorbent, à l'équilibre, à l'activité a_x. Ce travail nécessaire pour obtenir, dans des conditions données, la désorption de diverses fractions du potassium adsorbé est une indication relative de l'affinité que possède le colloïde pour les ions, à différents degrés de saturation. La valeur fixée ici à a_i est arbitraire, elle est fonction du dispositif expérimental. La variation du travail calculé ainsi permet cependant d'apprécier la variation concomitante de l'énergie de rétention des ions par un même colloïde à divers degrés de saturation, et même de comparer dif-

férents colloïdes entre eux, si l'on prend soin de donner à a_i les mêmes valeurs initiales.

Ainsi, $\Delta\overline{L}$ est une indication absolue de l'énergie de liaison ; $\Delta\overline{G}'$ est une mesure relative de l'énergie à fournir pour désorber l'ensemble des ions dans des conditions données en se plaçant dans un état déterminé du système. Le choix de cet état est entièrement arbitraire dans le cas des suspensions d'argiles ; pour les sols, l'état naturel représente une base particulièrement intéressante en vue de l'examen de leurs possibilités alimentaires à l'égard des plantes.

2° **Résultats numériques.**

a) *Variation d'enthalpie* $\Delta\overline{L}$ (*chaleur d'adsorption*).

Les valeurs de $\Delta\overline{L}$ correspondant à diverses quantités de potassium adsorbé sont données dans le tableau suivant. Elles sont calculées à partir des isothermes d'adsorption du graphique 1, c'est-à-dire entre 7° et 18°, 18° et 30°, 30° et 45°, 45° et 60°C, soit aux températures moyennes de 12,5°, 24°, 37,5° et 52,5°C. Elles sont exprimées en petites calories par ion-gramme de potassium. Les quantités effectivement désorbées entre les divers points des isothermes sont en réalité bien inférieures à un ion-gramme, mais, pour comparer les valeurs entre elles, il est préférable de les ramener à l'ion-gramme K^+.

Le calcul est effectué en considérant, à ces diverses températures, les mêmes quantités de potassium adsorbé, c'est-à-dire des états d'équilibre ne différant que par les activités des ions K^+ dans la solution. On obtient ainsi un certain nombre de « repères » sur les isothermes ; celles-ci étant continues, la variation des valeurs énergétiques est également continue.

Quantité de K adsorbé (p. p. m.)	$\Delta\overline{L}$, aux différentes températures moyennes :			
	12,5°	24°	37,5°	52,5°
220	— 2950	—	—	—
200	— 3320	— 3150	—	—
180	— 3320	— 3300	— 2770	—
160	— 3080	— 3300	— 2770	— 3040
140	— 3320	— 3150	— 3080	— 2710
120	— 3750	— 3300	— 2680	— 3170
100	— 3660	— 3150	— 2980	— 2950
80	— 3320	— 2830	— 2980	— 3030
60	— 3350	— 2930	— 2150	— 2950

Ces valeurs de $\Delta\overline{L}$ sont sensiblement indépendantes du degré de saturation de la kaolinite en potassium. On n'observe qu'à 12,5° une très légère augmentation de la chaleur d'adsorption, en valeur absolue, au

fur et à mesure de l'épuisement de l'argile. De faibles différences entre ces chiffres ne sont pas significatives, car ils ne sont obtenus qu'à 10 p. 100 prés environ, en raison de l'influence relativement faible de la température sur les équilibres. Pour une même quantité adsorbée, $\Delta\overline{L}$ diminue légèrement lorsque la température augmente. L'élévation de la température a certainement pour effet de dilater l'atmosphère ionique entourant les particules d'argile, et il est normal que l'énergie d'adsorption s'en trouve diminuée.

Dans l'ensemble, la valeur moyenne des $\Delta\overline{L}$ se situe vers — 3 000 calories par ion-gramme, ce qui indique des liaisons assez faibles, et uniformes quel que soit le degré de saturation. Le signe négatif montre qu'il y a libération de chaleur au moment de l'adsorption.

b) *Variation d'entropie* $\Delta\overline{S}$.

D'après la discussion précédente,

$$\Delta\overline{S} = \frac{\Delta\overline{L}}{T} = \frac{RT\, d \ln a}{dT}.$$

On obtient pour les valeurs de $\Delta\overline{S}$ un tableau comparable au précédent, puisque $\Delta\overline{L}$ et $\Delta\overline{S}$ ne diffèrent que par le facteur T. Les conclusions sont donc sensiblement les mêmes : $\Delta\overline{S}$ varie très peu selon la quantité adsorbée, et diminue légèrement lorsque la température s'élève. La valeur moyenne est d'environ — 10 calories par degré. Le signe négatif indique que l'adsorption se traduit par une diminution de l'entropie des ions K^+, qui perdent une partie de leurs possibilités d'arrangement, le désordre diminue. L'énergie correspondant à cette diminution d'entropie est fournie par la chaleur d'adsorption ($\Delta\overline{L} = T\Delta\overline{S}$).

Lorsque s'effectue l'adsorption ou la désorption d'une quantité d'ions K^+ suffisamment petite pour que l'équilibre ne soit pas notablement modifié (un point de l'isotherme), le système ne fournit ou ne reçoit aucun travail.

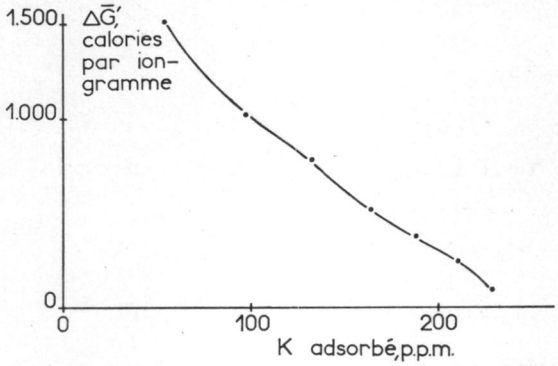
c) *Travail de désorption* $\Delta\overline{G}' = RT \ln \frac{a_i}{a_x}$.

Celui-ci est obtenu en considérant la variation d'activité des ions K^+ depuis la suspension initiale (a_i) jusqu'aux diverses activités de désorption (a_x).

$\Delta\overline{G}'$ mesure la variation de l'enthalpie libre partielle molaire des ions adsorbés, en fonction de la quantité adsorbée. Lorsque celle-ci augmente, l'activité a_x et l'enthalpie libre partielle molaire correspondante $\overline{G}_x$ augmentent également ; $\Delta\overline{G}'$, qui est calculé par rapport à la suspension initiale, diminue :

$$\Delta\overline{G}' = \overline{G}_i - \overline{G}_x.$$

On peut représenter $\Delta\overline{G}'$ en fonction des quantités de potassium restant adsorbées. Puisque la variation de a_x est continue, celle de $\Delta\overline{G}'$ l'est également. Les résultats sont indiqués sur le graphique 3. De même que $\Delta\overline{L}$, les valeurs de $\Delta\overline{G}'$ sont rapportées à l'ion-gramme K^+. Elles diminuent régulièrement quand la quantité de potassium augmente. Les pentes des tangentes à la courbe décroissent peu à peu, sans variation brutale. Cela implique que l'adsorption du potassium par l'argile s'effectue selon un mode uniforme, quelle que soit la quantité adsorbée. Cette conclusion est bien en accord avec la structure minéralogique de la kaolinite, qui laisse prévoir une adsorption homogène à la surface des cristaux. La variation de l'affinité est uniquement dûe à ce que les ions K^+ sont d'autant plus retenus qu'ils se trouvent en quantité plus faible, comme dans tous les phénomènes d'adsorption. Pour d'autres minéraux, par exemple la montmorillonite, les phénomènes sont plus complexes.



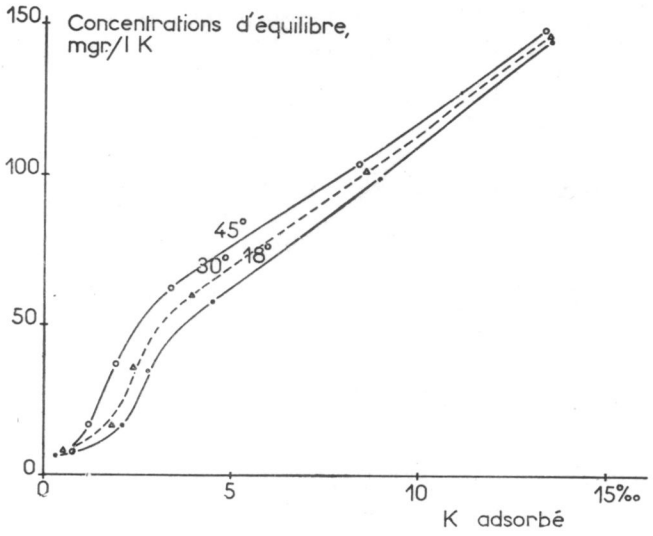
GRAPHIQUE 3. — Travail nécessaire pour obtenir la désorption à l'activité initiale, en fonction des quantités de potassium restant adsorbées.

Ce travail $\Delta\overline{G}'$ est fictif, il n'est pas réellement appliqué ici. Dans cette expérience, on diminue au contraire $\overline{G}_x$, en augmentant le volume de solution calcique, de façon à obtenir une suite d'états d'équilibre de désorption. Connaissant a_x, on peut néanmoins calculer $\Delta\overline{G}'$, qui sert à caractériser la variation de l'affinité du colloïde pour les ions, au fur et à mesure de la désorption.

Le problème envisagé ici est assez différent de l'étude d'une réaction chimique intervenant entre des corps en solution. Dans ce dernier cas, à une concentration donnée des corps réagissants correspond une affinité définie, et l'on peut calculer les énergies standard. Ici, l'affinité varie graduellement selon la quantité adsorbée, et selon la force ionique du milieu ; la détermination des valeurs standard, d'ailleurs extrêmement difficile et sujette à caution, ne semble pas présenter un très grand intérêt. Il importe plutôt de déterminer la variation de l'affinité, selon la quantité adsorbée et la nature du colloïde, à partir d'un état déterminé.

IV. — Désorption du potassium adsorbé par une montmorillonite.

La montmorillonite est une argile très différente de la kaolinite. Dans celle-ci, les surfaces d'adsorption sont uniquement les surfaces externes des cristaux (81). Chez la montmorillonite, les feuillets d'un même cristal sont souvent séparés par des couches d'eau. Il apparaît ainsi de grandes surfaces internes d'adsorption, qui sont environ dix fois plus grandes que les surfaces externes (82, 83). Il en résulte une capacité d'échange de cations beaucoup plus élevée. La densité de charges par unité de surface adsorbante reste du même ordre de grandeurs (84). L'énergie d'adsorption peut être cependant quelque peu différente.



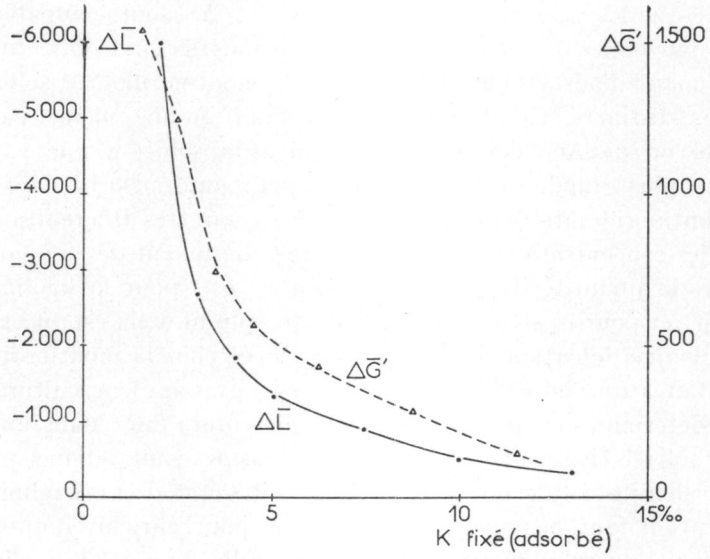
GRAPHIQUE 4. — Isothermes de désorption du potassium, à partir de la montmorillonite.

Dans cette expérience, la suspension initiale contenait, par cm³, 22,65 mg d'argile, 77,7 µg de Ca et 145 µg K. Le pH était de 8,3. Le potassium adsorbé représentait 13,45 p. 1 000 du poids de l'argile; il était entièrement échangeable contre des ions NH_4^+, aucune rétrogradation ne s'est manifestée dans ces conditions. Les dilutions ont été effectuées dans une solution d'acétate de calcium de pH 8,3, contenant 77,7 mg Ca par litre, à trois températures : 18°, 30° et 45°C. A 2 cm³ de suspension, il était ajouté : 0,3, 10, 20, 48 et 98 cm³ de solution calcique.

Le graphique 4 indique les résultats obtenus. On n'observe pas ici, comme dans le cas de la kaolinite, une courbe de désorption classique, mais un phénomène complexe dans lequel deux modes d'adsorption différents paraissent se superposer : l'un correspondant aux concentrations comprises entre 150 et 50 mg K par litre, l'autre aux concentrations

inférieures. Ce fait est à rapprocher de l'existence de surfaces internes et externes, sur lesquelles l'adsorption semble s'effectuer différemment.

L'influence de la température croît au fur et à mesure de la dilution. Le graphique 5 représente les valeurs obtenues pour $\Delta\bar{L}$. Contrairement à ce qui se passe pour la kaolinite, $\Delta\bar{L}$ varie considérablement ici. Les chaleurs d'adsorption sont très faibles au voisinage de la suspension initiale (environ — 300 calories par ion-gramme K^+), puis, lorsque la quantité



GRAPHIQUE 5. — Variation de $\Delta\bar{L}$ et $\Delta\bar{G}'$ en fonction des quantités de K adsorbées (montmorillonite).

adsorbée n'atteint plus 4 p. 1 000 d'argile, $\Delta\bar{L}$ augmente très fortement et atteint — 6 000 calories. La réaction est encore exothermique. Les valeurs de $\Delta\bar{S}$ obtenue par :

$$\Delta\bar{S} = \frac{\Delta\bar{L}}{T}$$

varient entre — 1 et — 20 calories par degré. L'adsorption du potassium sur la montmorillonite s'effectue donc avec des diminutions d'entropie et d'entalphie trés variables selon les quantités préalablement adsorbés.

Le même graphique 5 représente également la variation de $\Delta\bar{G}'$ en fonction des quantités adsorbées. De même que pour $\Delta\bar{L}$ et $\Delta\bar{S}$, les valeurs de $\Delta\bar{G}'$ augmentent très fortement lorsque la quantité de potassium adsorbée n'atteint plus 4 p. 1 000 d'argile. L'affinité de celle-ci pour les ions K^+ est alors beaucoup plus élevée, comme l'indiquent les trois caractéristiques énergétiques. Les deux mécanismes d'adsorption

mis en évidence par l'isotherme correspondent ainsi, le premier à des liaisons très faibles, le second à des liaisons nettement plus fortes (graph. 4 et 5). D'après les ordres de grandeurs des capacités d'échange, le premier mode d'adsorption semble dû aux surfaces internes, et le second aux surfaces externes de l'argile.

Si l'on compare les graphiques 3 et 5, on constate que, bien que l'allure de la variation de $\Delta\overline{G}'$ soit très différente pour les deux argiles, les valeurs absolues obtenues à la fin de la désorption sont assez voisines, de même que les valeurs moyennes de $\Delta\overline{L}$ et $\Delta\overline{S}$ sont compables. Les affinités moyennes des deux argiles pour les ions K^+ sont donc du même ordre, quoique l'adsorption s'effectue, sur la montmorillonite, selon deux processus distincts. On doit noter cependant qu'une même variation d'activité ou de AG' correspond, en valeur absolue, à une variation beaucoup plus grande de la quantité de potassium adsorbé dans le cas de la montmorillonite (les échelles d'abscisses sont très différentes). Ainsi, lorsque les concentrations d'équilibre, à 18°, diminuent de 30 à 20 mg K par litre, la quantité de potassium désorbée est, pour la kaolinite, de 37 p.p.m., et pour la montmorillonite de 500 p.p.m. Cela est dû à la capacité d'échange de cations beaucoup plus élevée chez la montmorillonite.

Ce fait a une importance pratique assez grande. Une culture a des besoins déterminés en potassium ; elle s'alimentera donc dans une solution du sol relativement constante si les ions K^+ sont retenus par une montmorillonite, beaucoup plus variable s'il s'agit d'une kaolinite. Inversement, il faut beaucoup plus d'engrais pour enrichir notablement la solution d'un sol à montmorillonite que celle d'un sol à kaolinite, si les teneurs en argile des deux sols sont égales.

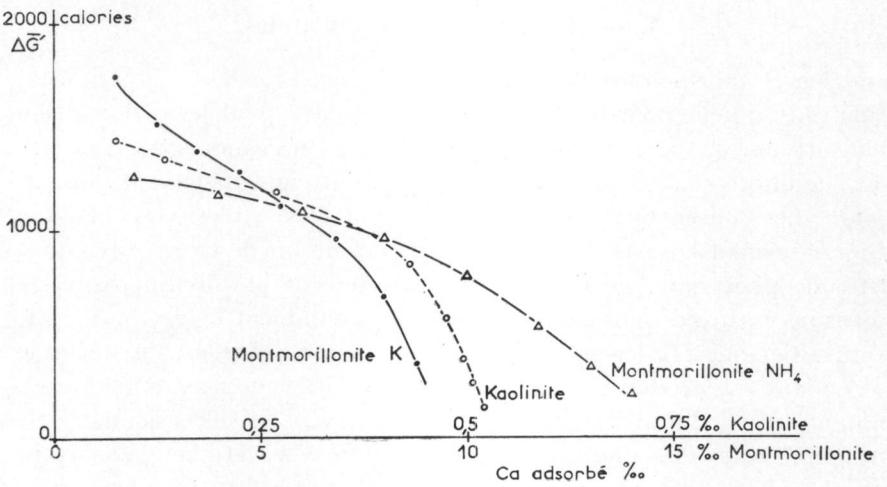
V. — Conclusions.

De ces divers essais d'adsorption et de désorption des cations par les argiles, on peut tirer les conclusions suivantes :

L'adsorption du potassium par la kaolinite s'effectue selon un mode uniforme ; la réaction est faiblement exothermique, la chaleur d'adsorption compensant, dans un état d'équilibre, la diminution d'entropie des ions K^+. Sur la montmorillonite, l'adsorption de ces ions se réalise selon deux processus distincts, de caractéristiques énergétiques différentes, qui s'expliquent par la structure plus complexe de cette argile. Le mécanisme de la réaction est le même. L'adsorption du potassium est d'autant plus intense que le milieu est plus acide (89).

On peut définir une mesure de la variation de l'affinité des argiles pour les ions en fonction de leur degré de saturation si l'on considère, dans un milieu de force ionique constante, la variation d'enthalpie libre partielle molaire des ions dans les solutions en équilibre avec différentes

quantités d'éléments adsorbés. Nous appelons « travail de désorption » cette valeur $\Delta\overline{G}'$. C'est le travail qu'il faudrait fournir pour réaliser à une activité a_i la désorption des ions qui, dans des conditions d'équilibre, se désorbent à une activité a_x inférieure à a_i. Pour des suspensions d'argile, la valeur de a_i est arbitraire ; elle prend une signification précise dans le cas des sols si l'on désigne ainsi l'activité des ions dans la solution du sol. Le travail de désorption $\Delta\overline{G}'$ est alors un indice de la variation de l'activité et de l'énergie de rétention des ions au fur et à mesure de l'épuisement des réserves.



GRAPHIQUE 6. — Variation de $\Delta\overline{G}'$ en fonction des quantités de Ca adsorbées.

La variation de ce travail de désorption en fonction des quantités d'ions adsorbées est de même forme pour les deux argiles, mais les valeurs absolues des quantités d'ions désorbés en fournissant un travail donné sont beaucoup plus grandes chez la montmorillonite, en raison de sa capacité d'échange plus élevée. A une même variation de l'activité des ions dans les solutions d'équilibre correspond une quantité adsorbée ou désorbée 10 à 20 fois plus grande dans le cas de la montmorillonite.

En ce qui concerne d'autres cations, signalons que l'on n'enregistre pas de phénomène thermique appréciable dans l'adsorption du calcium par la kaolinite et par la montmorillonite H ou Ca. La réaction est faiblement endothermique chez les argiles NH_4 ou K ; ce fait peut s'expliquer par une légère déshydratation provoquée par des raisons stériques (85, 86, 87, 88). L'adsorption du sodium par la montmorillonite s'effectue également sans variation thermique marquée. Les valeurs de $\Delta\overline{G}'$ sont du même ordre que pour le potassium (graph. 6).

B. — LES IONS PHOSPHORIQUES

L'adsorption et la désorption des ions phosphoriques ont été étudiées selon des techniques et des procédés d'interprétation comparables à ceux qui ont été utilisés pour les cations. Les essais ont également porté sur la kaolinite et la montmorillonite ; leur but est l'examen de la réaction d'adsorption, et l'étude de la variation de l'affinité des argiles pour ces ions en fonction des quantités adsorbées.

I. — Techniques expérimentales.

Un certain nombre de difficultés techniques rendent l'expérimentation plus difficile pour les ions phosphoriques que pour les cations. Dans l'adsorption et dans la désorption, les temps nécessaires à l'obtention de l'équilibre sont beaucoup plus longs, ils atteignent souvent plusieurs jours. Les concentrations des solutions sont très faibles, ces ions étant énergiquement adsorbés, et les dosages portent sur de très petites quantités de phosphore. Le dosage chimique devient parfois impossible, et il est nécessaire d'utiliser divers artifices, notamment les isotopes radioactifs. Lorsque l'on élève la température des suspensions, des réactions secondaires se produisent fréquemment avec les constituants de l'argile, notamment l'aluminium et éventuellement le fer, occasionnant des insolubilisations de phosphore. Enfin, si l'on veut étudier l'adsorption du phosphore dans des conditions comparables à celles qui sont réalisées dans les sols, il est nécessaire de se placer en milieu calcique, et sensiblement neutre (39). Il faut alors éviter la précipitation de phosphates calciques ; d'autre part, les ions phosphoriques représentent dans ces conditions un mélange d'ions $PO_4H_2^-$ et PO_4H^{--}, le pK de la seconde fonction acide de PO_4H_3 étant 7,2 (90). Conformément à un usage maintenant répandu, nous désignons dans ce travail par « ions PO_4 » le mélange des ions $PO_4H_2^-$ et PO_4H^{--}, sans indication de la valence.

1° Adsorption du phosphore.

L'argile H est tout d'abord additionnée d'eau de chaux de façon à obtenir un pH voisin de 7. Puis elle est placée dans une solution de chlorure de calcium 0,01 N ou 0,02 N pour réaliser une force ionique constante. Le phosphore est ensuite apporté sous forme d'une solution de phosphate monocalcique, de façon à saturer sensiblement l'argile en ions PO_4 sans que la concentration en P de la solution dépasse 4 mg par litre. Au-delà de ce seuil, il se forme des précipitations de phosphates calciques qui ne se dissolvent que très lentement (39). L'adsorption est

donc conduite ainsi : à la suspension d'argile Ca additionnée d'un grand volume de solution de chlorure de calcium (4 litres de solution pour 17 g de montmorillonite), on ajoute 16 mg de phosphore sous forme de phosphate monocalcique. Après une agitation de quelques heures, on mesure la concentration en P de la solution, et l'on en déduit la quantité de phosphore qu'il faut ajouter pour ramener la concentration à 4 mg par litre. Cette opération est renouvelée jusqu'à ce que la concentration, après l'agitation, ne soit plus sensiblement inférieure à 4 mg par litre. La suspension est alors abandonnée pendant plusieurs jours, en l'agitant périodiquement, pour que l'équilibre soit bien établi. La plus grande partie de la solution surnageante est ensuite siphonnée, afin que la suspension soit suffisamment concentrée. Connaissant la quantité totale de phosphore introduite, la quantité retirée au moment du siphonnage et la concentration de la solution à l'équilibre, on déduit la quantité adsorbée par unité de poids d'argile.

2° Désorption du phosphore.

La désorption des ions phosphoriques est effectuée dans une solution de chlorure de calcium identique à celle qui a servi de milieu d'adsorption, à force ionique constante. Comme pour la désorption des cations, des volumes croissants de cette solution sont ajoutés à des volumes constants de la suspension d'argile. Les suspensions diluées obtenues ainsi sont ensuite agitées à température constante jusqu'à obtention de l'équilibre, soit un à trois jours selon les cas. L'appareil utilisé à cet effet est un agitateur rotatif placé dan un bain-marie thermostaté ; il a été spécialement conçu pour ces travaux, les agitateurs thermostatés à secousses n'homogénéisant pas suffisamment les suspensions d'argiles ou de terres. Les solutions en équilibre avec l'argile sont ensuite séparées par filtration ; celle-ci est faite dans une étuve si la désorption a été réalisée à une température différente de l'ambiante.

3° Dosage du phosphore dans les solutions.

Dans les solutions relativement concentrées, ce dosage est effectué par coeruléo-molybdimétrie, en utilisant l'acide aminonaphtolsulfonique comme agent réducteur (91).

Nous avons été amené à utiliser un artifice pour doser le phosphore aux concentrations très faibles ; il s'agit de l'isotope radioactif ^{32}P. En utilisant une masse infime d'élément, il est possible d'obtenir un bon dosage de la radioactivité. Le principe de cette méthode consiste à introduire dans la suspension une petite quantité d'ions $^{32}PO_4$, et à déterminer

ensuite le rapport $^{31}P/^{32}P$ dans les solutions en équilibre avec l'argile. L'équilibre s'entend ici dans un double sens :

— équilibre de désorption, c'est-à-dire constance, dans le temps, de la concentration en P de la solution placée au contact de l'argile ;

— équilibre de distribution isotopique, c'est-à-dire constance de la radioactivité contenue dans cette solution (compte tenu, évidemment, des pertes dûes aux désintégrations).

A l'équilibre, il existe dans la solution un rapport $^{31}P/^{32}P$ bien défini ; par définition, ce rapport est d'ailleurs le même dans la fraction du phosphore adsorbée par l'argile. Aussi, il reste constant lorsque le rapport argile/solution varie.

Ce rapport $^{31}P/^{32}P$ peut être déterminé dans les solutions à un stade quelconque de la désorption, et en particulier lorsque le dosage chimique de P est fait dans de bonnes conditions. Le dosage de la radioactivité est toujours possible, quel que soit le stade de la désorption, puisqu'il suffit d'en introduire suffisamment. On peut donc déterminer ^{32}P sans difficulté.

Lorsque le dosage chimique devient impossible parce que les concentrations sont trop faibles, il suffit ainsi de doser ^{31}P dans les solutions, et, connaissant le rapport constant $^{31}P/^{32}P$, on en déduit ^{31}P.

Plusieurs remarques s'imposent quant à cette technique :

1° La masse de ^{32}P, lorsqu'il est apporté sans entraîneur, est négligeable par rapport à la masse de ^{31}P. Dans ces essais, la masse de ^{32}P représente 1/20 000 de la masse de ^{31}P. Elle ne modifie pas les équilibres argile-solution.

2° Le dosage chimique indique en réalité la somme $(^{31}P + ^{32}P)$. La masse de ^{32}P étant négligeable par rapport à celle de ^{31}P, on peut, pour simplifier les notations, désigner par $^{31}P/^{32}P$ le rapport des résultats $\frac{\text{dosage chimique}}{\text{dosage radioctivité}}$, qui est en toute rigueur le rapport $\frac{^{31}P + ^{32}P}{P^{32}}$.

3° Ce rapport $^{31}P/^{32}P$ peut être déterminé, pour augmenter la précision, à plusieurs stades de la dilution.

4° On dispose d'un moyen de contrôle de l'établissement de l'équilibre de distribution isotopique autre que le dosage, en fonction du temps, de la radioactivité que renferme la solution. La quantité totale Q de phosphore contenue dans la suspension est connue, d'après les dosages effectués à la fin de l'adsorption (paragr. 1). La quantité d'ions en solution q est déterminée par le dosage chimique ; la différence r est restée adsorbée par l'argile :

$$r = Q - q.$$

Si l'on applique la relation classique :

$$\frac{\text{P isotopiquement dilué}}{\text{P en solution}} = \frac{\text{Radioactivité introduite I}}{\text{Radioactivité en solution } s}$$

qui devient ici :

$$\frac{Q}{q} = \frac{I}{s}$$

on doit retrouver d'après le rapport $\frac{I}{s}$ la quantité Q de phosphore que l'on sait avoir introduite dans la suspension. C'est un bon moyen de contrôle.

Les dosages de radioactivité sont effectués en précipitant les ions $^{32}PO_4$ sous forme de phosphomolybdate d'ammonium, en présence d'un gros excès de phosphore ordinaire agissant comme entraîneur. Le précipité est ensuite isolé et séché, et les désintégrations sont dénombrées au compteur cloche.

4° **Mesure des vitesses de dilution isotopique.**

Dans la technique décrite ci-dessus, le phosphore radioactif est utilisé comme moyen de dosage, quand les méthodes chimiques ne sont plus applicables. Il est apparu intéressant également d'utiliser l'isotope ^{32}P à des recherches d'ordre cinétique. Les suspensions d'argile envisagées ici renferment des ions phosphoriques à l'état adsorbé d'une part, à l'état libre dans la solution d'autre part. L'équilibre se traduit par un régime permanent d'échange d'ions entre les deux phases, tous ces ions « passant une partie de leur temps » dans chacune d'elles. Si l'on introduit dans le système une masse d'ions $^{32}PO_4$ suffisamment petite pour ne pas perturber l'équilibre, on peut mesurer par des dosages de radioactivité la vitesse avec laquelle ces ions marqués se mêlent aux ions $^{31}PO_4$, c'est-à-dire la vitesse de la dilution isotopique. Si la suspension est suffisamment agitée, la dilution isotopique est pratiquement instantanée dans la phase solution. Il n'en est pas de même sur l'adsorbant, où l'équilibre de distribution isotopique n'est atteint qu'au bout de plusieurs jours.

Cette lenteur de la dilution isotopique peut être dûe à deux causes :

— des facteurs stériques limitant la diffusion des ions dans des espaces peu accessibles. Ces facteurs sont concevables dans le cas des sols, où l'on a affaire à des agrégats relativement gros et complexes ; ils apparaissent plus douteux en ce qui concerne les argiles ;

— des facteurs énergétiques, en l'occurrence des énergies d'activation, qui déterminent les vitesses de réaction.

La dilution isotopique est un phénomène très complexe, qui semble encore imparfaitement compris ; il met en jeu en même temps des réactions d'échange ou d'adsorption, et des ruptures continuelles d'équilibres de distribution. Lorsque l'on ajoute *à un système en équilibre chimique* une très petite quantité d'ions $^{32}PO_4$, ceux-ci tendent à se répartir, entre les deux phases et entre les diverses positions d'adsorption de la phase

solide, de la même façon que les ions $^{31}PO_4$, de sorte que le rapport $\frac{^{31}PO_4}{^{32}PO_4}$ soit le même en tous les points du système. Si l'on tente de se représenter les phénomènes réels, on peut les concevoir ainsi :

1° Si l'on ajoute au système en équilibre une quantité supplémentaire d'ions PO_4 ($^{32}PO_4$), aussi petite soit-elle, elle doit se répartir entre les deux phases selon le coefficient de partage qui caractérise l'équilibre. Elle tend en outre à former un mélange homogène avec les ions $^{31}PO_4$. En somme, les ions $^{32}PO_4$ doivent se surajouter et se mêler, en tous les points du système, aux ions $^{31}PO_4$.

2° En raison de l'agitation thermique, il intervient dans la phase solide des réactions d'échange entre les ions $^{31}PO_4$ et $^{32}PO_4$, de même que, dans un cristal de sulfate de calcium, des ions $^{45}Ca^{++}$ s'échangent contre des ions $^{40}Ca^{++}$ (2).

3° Lorsque l'on met en jeu des ions adsorbés, la distribution isotopique est plus ou moins rapide selon la nature des ions, mais elle n'est jamais instantanée. En fait, des ions $^{32}PO_4$ quittent peu à peu la solution pour se fixer sur la phase solide. Entre le moment où l'on introduit les ions $^{32}PO_4$ et celui où l'équilibre de distribution est définitivement atteint, il s'établit toute une suite d'équilibres transitoires rapidement rompus. On admet (2,48) qu'à chacun de ces équilibres transitoires on peut appliquer la relation classique :

$$\frac{\text{P isotopiquement dilué}}{\text{P en solution}} = \frac{\text{Radioactivité introduite}}{\text{Radioactivité en solution}}.$$

Le terme (P en solution) est déterminé d'après le dosage de la concentration en P de la solution ; si l'équilibre chimique est bien atteint, ce terme est constant. La radioactivité introduite est connue ; la radioactivité restant en solution est déterminée par dosage. En appliquant à différents temps cette relation, on en déduit les quantités d'ions phosphoriques parvenues à l'équilibre de distribution isotopique aux temps considérés. En représentant en fonction du temps les quantités de phosphore isotopiquement diluées, on note, d'après les tangentes à la courbe, les vitesses de dilution isotopique correspondant à chacun de ces temps. A chaque temps correspond ainsi :

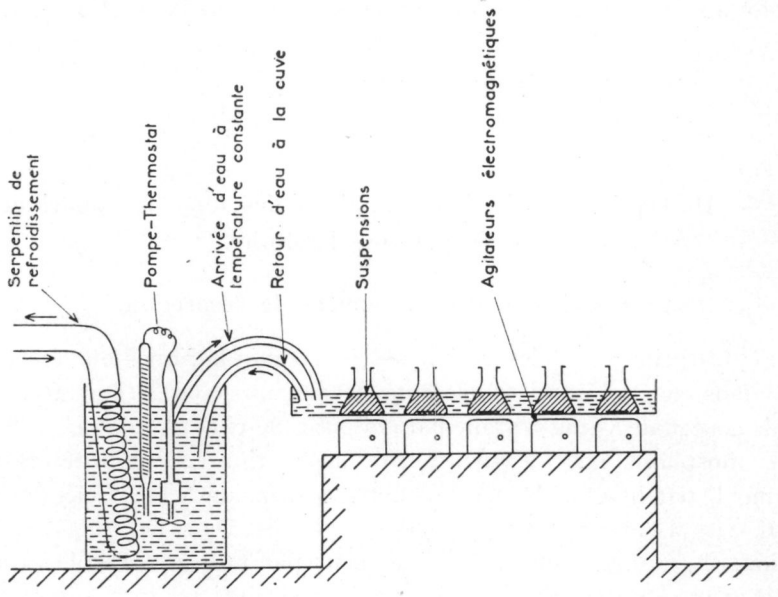
— une vitesse de dilution isotopique,

— une quantité de P isotopiquement diluée.

Le temps constituant un facteur commun à ces deux grandeurs, on peut également examiner la variation de la vitesse de dilution isotopique en fonction des quantités isotopiquement diluées.

La technique de la dilution isotopique a été conduite de la façon suivante :

a) *Préparation de la suspension.* — La suspension d'argile est tout d'abord agitée à température constante jusqu'à obtention de l'équilibre chimique, soit un à trois jours. Elle est ensuite placée dans un thermostat, et agitée de façon très intense à l'aide d'un agitateur électromagnétique. Pour obtenir à la fois une température constante et cette agitation intense, nous utilisons le montage représenté sur le graphique 7. Une thermopompe placée dans une cuve envoie de l'eau à température constante dans un bac reposant sur une batterie d'agitateurs ; l'eau retourne à la cuve par un siphon. Un serpentin plongeant dans la cuve permet de réaliser une circulation d'eau froide pour compenser le léger échauffement dû aux agitateurs, lorsque les dilutions isotopiques sont effectuées à des températures voisines de l'ambiante.



GRAPHIQUE 7. — Appareillage utilisé pour la mesure des vitesses de dilution isotopique.

b) *Introduction des ions* $^{32}PO_4$. — Le phosphore radioactif utilisé est de l'acide phosphorique $^{31}PO_4H_3$ sans entraîneur. A la réception du produit, il est incorporé à une solution diluée de phosphate monocalcique. L'addition de cette très petite quantité d'entraîneur a pour but d'éviter l'adsorption des ions $^{32}PO_4$ sur le verre des récipients, en particulier des pipettes, qui est une importante source d'erreurs. Cette solution-mère est ensuite diluée en fonction des besoins.

Pour une suspension contenant 8 g d'argile dans 100 cm³ de solution saline, nous introduisons environ 10 microcuries $^{32}PO_4$, à l'état dissous dans 1 cm³ d'une solution de phosphate monocalcique de concentration

identique à celle de la solution en équilibre avec l'argile, afin de ne pas modifier l'équilibre chimique.

c) *Séparation de la solution.* — Au bout de temps déterminés, par exemple 2, 5, 10, 30, 60 minutes..., une fraction de la solution est filtrée rapidement sur filtre de Maume (plaque de verre-fritté adaptée sur une fiole à vide). La solution est recueillie dans un tube à essais placé sous le filtre ; le fond de la fiole à vide est garni d'eau, afin d'assurer dans l'enceinte une tension de vapeur d'eau suffisante pour éviter une évaporation appréciable de la solution.

d) *Dosages.* — A partir de cette solution, le dosage chimique du phosphore et le dosage de la radioactivité sont effectués par les méthodes indiquées ci-dessus. Les radioactivités dénombrées sont comparées à une gamme obtenue à partir de dilutions exactes de la solution radioactive initiale ; on établit ainsi le rapport

$$\frac{\text{Radioactivité introduite}}{\text{Radioactivité restant en solution}}.$$

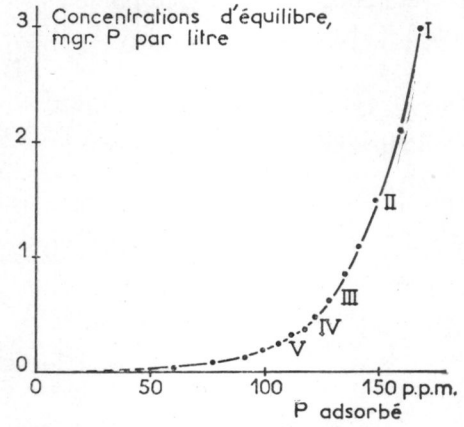
II. — Désorption et dilution isotopique des ions phosphoriques adsorbés par une kaolinite.

1° Établissement de la courbe de désorption.

L'adsorption et la désorption des ions phosphoriques ont été effectuées dans une solution de chlorure de calcium 0,01 N. La suspension initiale contenait 85 mg d'argile par cm^3, et celle-ci avait adsorbé 168 p.p.m. de phosphore. La concentration de la solution en équilibre était de 2,89 mg P par litre, et le pH 6,6. Cette suspension a été diluée 2, 3, 5, 10, 16, 24, 32, 48, 90, 170, 250, 400 et 570 fois. Dans les cinq dernières dilutions, le dosage a été fait uniquement par radioactivité, le rapport $^{31}P/^{32}P$ ayant été déterminé sur les premières dilutions. Pour 53 grammes d'argile, il avait été introduit 1,8 millicuries $^{32}PO_4$. La concordance des deux techniques de dosage est satisfaisante. L'extraction a été réalisée à 7°, 18° et 40°C.

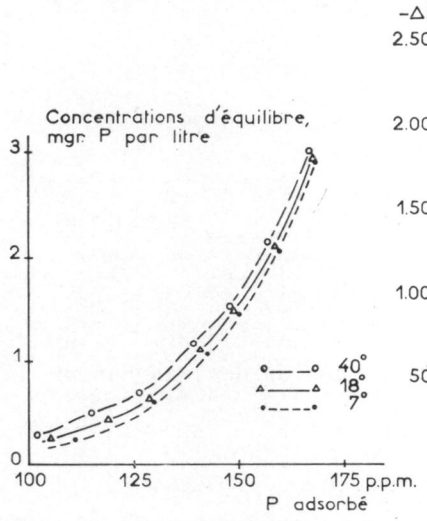
La courbe de désorption obtenue à 18° est représentée sur le graphique 8. Aux concentrations d'équilibre les plus élevées, de fortes différences entre ces concentrations correspondent à de faibles variations des quantités adsorbées ; cela indique que l'argile est sensiblement saturée d'ions phosphoriques. La désorption suit approximativement la loi de Langmuir. Le graphique 9 représente l'influence de la température sur les équilibres d'adsorption. Cette influence est peu marquée, elle n'a pu être étudiée qu'aux rapports argile-solution assez élevés. Les valeurs de $\Delta\overline{L}$, calculées comme dans le cas des cations, sont portées sur le gra-

phique 10. Elles augmentent fortement au fur et à mesure que la quantité adsorbée diminue ; la réaction d'adsorption est exothermique, et la

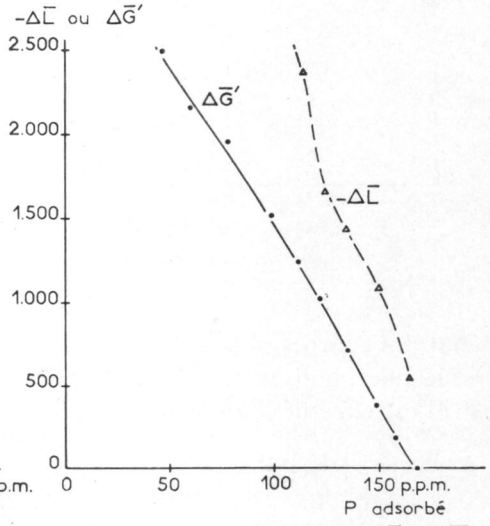


GRAPHIQUE 8. — Courbe de désorption, à 18°, des ions PO_4 adsorbés sur la kaolinite.

chaleur d'adsorption est plus élevée que pour les cations. Elle atteint ici 2 500 calories par ion-gramme PO_4, quoique la quantité adsorbée soit encore importante.



GRAPHIQUE 9. — Influence de la température sur les équilibres kaolinite-PO_4.



GRAPHIQUE 10. — Variation de $\Delta\bar{L}$ et $\Delta\bar{G}'$ en fonction des quantités adsorbées. Kaolinite

L'entropie d'adsorption $\Delta\bar{S}$ varie ici de 2 à 8 calories par degré.

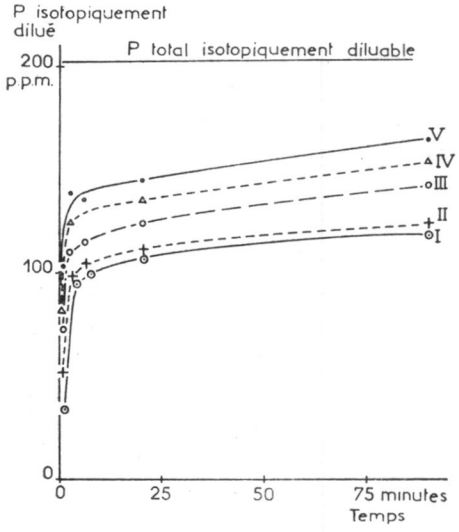
La variation du travail de désorption $\Delta\bar{G}'$ est représentée sur le même graphique. L'affinité de la kaolinite pour les ions PO_4 augmente très fortement lorsque la quantité adsorbée diminue. On ne peut extraire les dernières fractions adsorbées qu'à des concentrations extrêmement faibles des solutions d'équilibre.

2° Mesure de la vitesse de dilution isotopique.

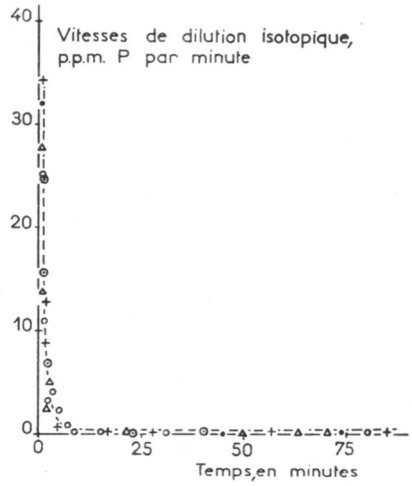
Ces mesures ont été effectuées à 18° sur cinq suspensions de rapports argile/solution variables. Elles correspondent à différents stades de la désorption, qui sont notés sur le graphique 8 (n° I, II, III, IV, V).

Plus la suspension est diluée, plus la proportion relative de P en solution est grande, mais plus la concentration en P de la solution d'équilibre est faible.

Après l'addition de ^{32}P, les prélèvements ont été faits au bout de 2, 6, 20, 90 minutes ; 7, 24, 72 heures. Le graphique 11 représente le



GRAPHIQUE 11. — Quantités de P isotopiquement diluées, en fonction du temps.



GRAPHIQUE 12. — Vitesses de dilution isotopique, en fonction du temps

début des courbes obtenues en portant, en fonction du temps, les quantités de phosphore isotopiquement diluées à chacun des prélèvements. Le calcul est effectué d'après la relation :

$$\frac{\text{P isotopiquement dilué}}{\text{P en solution}} = \frac{\text{Radioactivité introduite}}{\text{Radioactivité en solution}}.$$

On admet que les ions PO_4 de la solution se sont isotopiquement dilués en un temps très court, voisin de Zéro ; ils correspondent aux valeurs notées en ordonnées à l'origine des courbes. L'augmentation dans le temps des quantités isotopiquement diluées ne se rapporte qu'à des ions PO_4 adsorbés.

Les cinq courbes sont de même forme ; elles mettent en évidence une dilution isotopique initiale très rapide, qui intervient pendant les dix premières minutes environ, puis un phénomène beaucoup plus lent.

L'équilibre de distribution n'est définitivement atteint qu'au bout de plusieurs jours. Cette lenteur correspond bien à celle que l'on observe également dans l'établissement de l'équilibre chimique. L'existence de deux cinétiques distinctes apparaît plus clairement encore dans le graphique 12, qui représente les vitesses de dilution isotopique en fonction du temps. Ces vitesses sont très élevées pendant les premières minutes, puis elles diminuent considérablement, avec une sorte de discontinuité entre les deux parties des courbes. La dilution isotopique ne se comporte donc certainement pas comme une réaction homogène. Ce fait est bien connu dans le cas des sols, où il s'explique assez aisément en raison de la complexité du milieu (48). Il apparaît plus singulier chez des argiles.

3° Interprétation des résultats.

a) *Cinétique de la dilution isotopique.* — L'adsorption des ions phosphoriques sur les argiles semble s'effectuer selon deux mécanismes essentiels :

— une fixation sur les atomes d'aluminium de la surface des particules, mise en évidence par WEY (31) ; elle est surtout importante en milieu acide ;

— une rétention par les cations de la double couche ionique qui entoure ces particules, étudiée par BARBIER. Les ions Ca^{++} sont particulièrement actifs à cet égard (39).

Une partie des ions phosphoriques serait donc retenue sur les positions fixes que représentent les atomes d'aluminium. L'autre partie serait au contraire en mouvement continuel, avec les cations de la double couche. La dilution isotopique de ceux-ci est rapide, elle s'effectue en quelques minutes (2,49). On conçoit mal que les ions phosphoriques qui sont mêlés à eux ne se diluent pas aussi rapidement. Aussi, la première phase rapide constatée dans ces essais semble devoir être attribuée aux ions phosphoriques de la double couche ; les temps nécessaires à la dilution isotopique des cations d'une part, de ces ions PO_4 d'autre part sont comparables. La rapidité de ce phénomène est concevable, puisque les ions se trouvent en agitation thermique continuelle.

Il n'en est pas de même des ions PO_4 retenus à la surface du réseau cristallin par les atomes d'Al ; ces ions sont dans des positions relativement fixes. Par ce fait même, ils mettent certainement en jeu des énergies d'activation beaucoup plus grandes que les ions qui sont continuellement agités, ce qui implique une vitesse de réaction beaucoup plus faible.

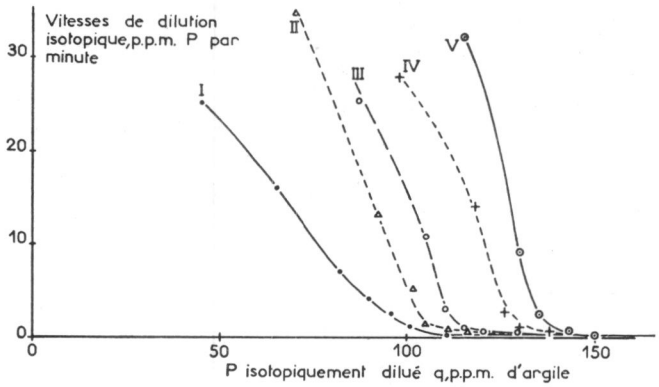
On peut schématiser ainsi cette hypothèse d'interprétation :

— ions retenus dans la double couche : mouvements étendus, énergie d'activation faible, dilution isotopique rapide.

— ions retenus à la surface des particules : mouvements très réduits, énergie d'activation élevée, dilution isotopique lente.

La cinétique de l'établissement des équilibres chimiques n'a pas été étudiée systématiquement dans ce travail, car elle semble peu féconde pour caractériser la mobilité de diverses fractions des ions PO_4. En effet, la vitesse de désorption de quantités déterminées d'ions PO_4 n'est pas définie, elle dépend de la concentration de la solution d'équilibre, c'est-à-dire du rapport argile/solution. Une même quantité d'ions phosphoriques se désorbe lentement si la concentration extérieure est élevée (rapport argile/solution grand) ; elle se désorbe rapidement si la concentration extérieure est faible (rapport argile/solution petit). On remarque toutefois, au cours des manipulations, des faits comparables à la cinétique de dilution isotopique : il se produit pendant les premières minutes une désorption rapide, puis l'équilibre s'établit très lentement, généralement en un à trois jours. Ces faits sont donc en accord avec l'intervention probable de deux catégories d'ions PO_4, dont les cinétiques d'adsorption et de désorption sont très différentes, en raison d'énergies d'activation fort inégales.

b) *Influence du rapport argile/solution sur la vitesse de dilution isotopique.* — D'après les courbes du graphique 11, qui représentent les quan-



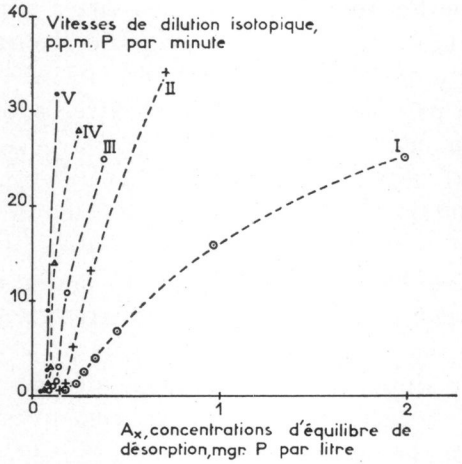
GRAPHIQUE 13. — Vitesses de dilution isotopique en fonction des quantités de P isotopiquement diluées q, à divers rapports argile-solution.

tités de P isotopiquement diluées en fonction du temps, à chacun de ces temps t correspondent des quantités de P isotopiquement diluées q, et des vitesses de dilution isotopique $v = dq/dt$. Le temps t constituant un facteur commu n à v et à q, on peut examiner les relations existant entre ces deux grandeurs, aux divers rapports argile/solution.

Le graphique 13 représente la variation des vitesses de dilution isotopique v en fonction des quantités de P isotopiquement diluées q, dans les cinq suspensions de rapports argile/solution différents. Pour

chacune des suspensions, la vitesse v diminue naturellement au fur et à mesure que la quantité diluée q augmente, mais v est également fonction du rapport argile/solution. Les cinq courbes sont bien détachées les unes des autres ; une même fraction d'ions phosphoriques adsorbés, par exemple celle qui est comprise entre 100 et 110 p.p.m. d'argile, se dilue isotopiquement avec une vitesse beaucoup plus grande dans la suspension IV que dans la suspension I. La vitesse de dilution isotopique d'une fraction des ions PO_4 adsorbés n'est donc définie qu'en tenant compte du rapport argile/solution, de même que la vitesse de désorption (paragraphe précédent).

c) *Comparaison des vitesses de dilution isotopique et des énergies d'adsorption.* — A la désorption d'une quantité donnée de phosphore



GRAPHIQUE 14. — Vitesses de dilution isotopique à divers rapports argile/solution, en fonction des concentrations d'équilibre de désorption.

correspond une concentration bien définie de la solution en équilibre avec l'argile (graphique 8). Les variations de concentrations observées dans ces solutions de force ionique constante représentent, à un facteur proportionnel près, les variations d'activités. Entre les diverses activités d'équilibre, le travail de désorption $\Delta\overline{G}'$ rend compte de la différence d'affinité de l'argile pour les ions PO_4.

De même, à la dilution isotopique de toute quantité d'ions PO_4 correspond, pour chaque rapport argile/solution, une vitesse de dilution isotopique déterminée.

En prenant pour facteur commun à ces deux séries d'essais les mêmes quantités d'ions PO_4 ayant participé aux réactions, c'est-à-dire désorbées ou isotopiquement diluées, il est possible de comparer la vitesse de dilution isotopique à l'activité de désorption a_x, ainsi qu'à la variation

$\Delta\overline{G}'$ d'enthalpie libre partielle molaire (travail de désorption). Une portion quelconque de P désorbée peut être caractérisée par l'activité a_x dans la solution à l'équilibre de désorption, le travail de désorption $\Delta\overline{G}'$ relatif à une activité initiale a_i et les vitesses de dilution isotopique aux divers rapports argile/solution.

Examinons tout d'abord les relations entre les vitesses de dilution isotopique et les activités de désorption, représentées par le graphique 14. Pour chacune des suspensions, la vitesse v diminue au fur et à mesure que a_x diminue également, mais les courbes relatives aux divers rapports argile/solution sont très éloignées les unes des autres, il n'apparaît pas de relation générale. Ainsi, une vitesse de dilution isotopique de 20 p.p.m. P par minute correspond à des valeurs de a_x très différentes : 0,11 ; 0,17 ; 0,31 ; 0,43 et 1,35 μg P par cm^3. La vitesse de dilution isotopique n'est donc pas une fonction définie de l'activité à laquelle les ions PO_4 sont susceptibles de se désorber. Ces activités de désorption sont proportionnelles aux activités sur l'adsorbant, sinon égales. On peut donc dire qu'il n'existe pas de relation générale entre l'activité et la vitesse de dilution isotopique des ions PO_4.

Ce fait ressort déjà des graphiques 11 et 12 : quels que soient le rapport argile /solution et la concentration d'équilibre, les courbes gardent la même forme. L'existence de deux cinétiques très différentes en a été déduite. Ces deux cinétiques, correspondant aux deux modes d'adsorption, persistent quelle que soit l'activité des ions PO_4, laissant su pposer un équilibre entre les deux modes de rétention.

Ainsi, la vitesse de dilution isotopique dépend plus du rapport argile/solution que de l'activité des ions PO_4. La modification de ce rapport argile/solution entraîne surtout la variation des concentrations d'équilibre : celle-ci est de 0,265 μg P par cm^3 dans la suspension V contre 2,89 μg P par cm^3 dans la suspension I. L'ensemble des ions ($^{31}PO_4 + {}^{32}PO_4$) se trouve donc, dans le premier cas, à une activité relative 0, 265, et dans le second cas à une activité relative 2,89. Le travail de désorption $\Delta\overline{G}'$ tel que :

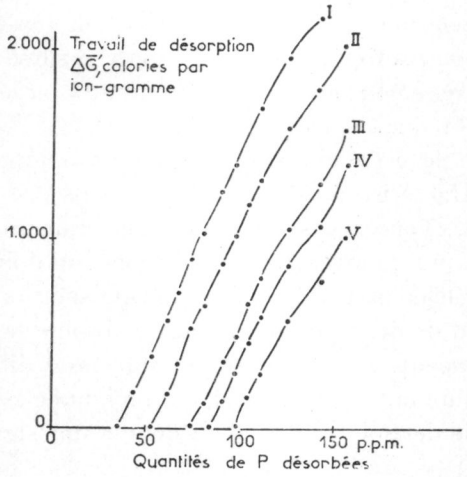
$$\Delta\overline{G}' = RT \ln \frac{a_i}{a_x}$$

a été calculé pour chacune des cinq suspensions en désignant par a_i ces concentrations d'équilibre, soit :

Suspensions	a_i
I	2,89
II	1,5
III	0,62
IV	0,435
V	0,265

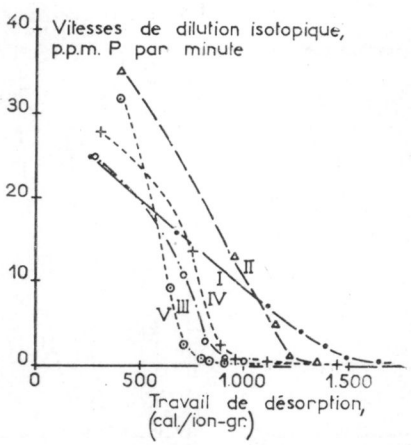
a_x indique les concentrations de désorption. Les valeurs de $\Delta\overline{G}'$ obtenues ainsi sont portées sur le graphique 15 en fonction des quantités de phos-

phore extraites, dans les cinq suspensions, à partir de ces activités initiales a_i. Ces courbes sont en fait les mêmes, décalées à l'origine les unes par rapport aux autres de RT ln cI/cII, RT ln cI/cIII,... Les abscisses



GRAPHIQUE 15. — Travail de désorption en fonction des quantités de P désorbées.

correspondant à $\Delta\overline{G}' = 0$ représentent le phosphore de la solution, qui augmente lorsque le rapport argile/solution diminue. Le choix de ce mode de calcul se justifie ainsi : $\Delta\overline{G}'$ indique la variation de l'affinité



GRAPHIQUE 16. — Kaolinite. Vitesses de dilution isotopique en fonction du travail de désorption.

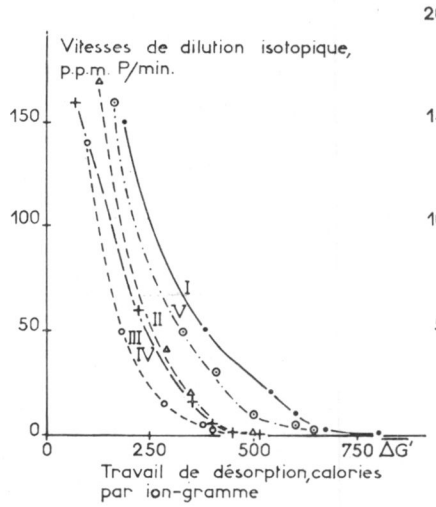
argile-ions PO_4 à partir des stades de désorption caractérisés par les solutions de concentrations cI, cII,... dans lesquelles se trouvent les ions $^{32}PO_4$. C'est le travail de désorption compté à partir de chacune des suspensions qui renferment les ions $^{32}PO_4$.

Sur le graphique 16, les vitesses de dilution isotopique sont comparées au travail de désorption. La variation est beaucoup plus homogène que sur le graphique 14 (comparaison aux activités), les courbes se fondent mieux entre elles, et ne se placent pas dans l'ordre de concentration des suspensions. La relation est assez lâche, mais elle existe néanmoins. La vitesse de dilution isotopique dépend donc surtout de la variation de l'affinité de l'argile pour les ions PO_4 au fur et à mesure que la dilution se poursuit, plutôt que de leur activité.

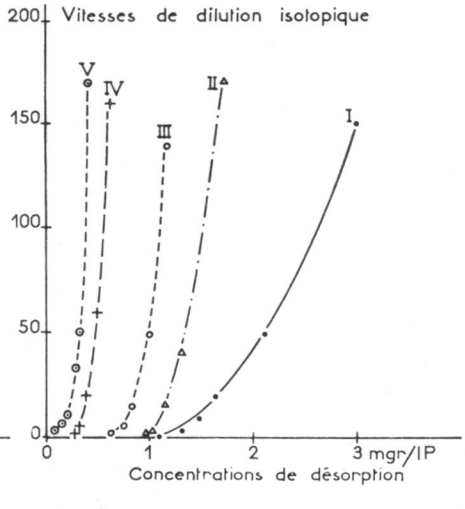
Dans l'ensemble, cette vitesse de dilution isotopique n'est pas étroitement liée aux caractéristiques énergétiques, mais elle n'en est pas non plus indépendante. Tout se passe comme si elle était principalement limitée par le travail qu'il faudrait fournir aux ions qui doivent se diluer isotopiquement si l'on voulait les désorber dans la solution qui renferme les ions $^{32}PO_4$ (travail de désorption). La valeur absolue de l'activité n'intervient pas notablement. Ce phénomène semble assez difficile à expliquer. Il s'agit surtout d'un fait expérimental, qui prend une assez grande importance dans l'étude des sols, où la valeur de a_i a une signification précise.

III. — Désorption et dilution isotopique des ions phosphoriques adsorbés sur une montmorillonite.

Nous résumerons seulement les principaux résultats, qui sont comparables à ceux qui ont été exposés dans le cas de la kaolinite. Les quan-



GRAPHIQUE 17. — Vitesses de dilution isotopique en fonction du travail de désorption.



GRAPHIQUE 18. — Vitesses de dilution isotopique en fonction des concentrations de désorption.

tités de P adsorbées sont beaucoup plus élevées, car la montmorillonite possède grâce à l'étendue de ses surfaces interlamellaires une capacité

d'échange d'ions beaucoup plus grande. Lorsque l'on fournit par ion-gramme un même travail de désorption, la quantité d'ions PO_4 désorbée par la montmorillonite est environ dix fois plus élevée. De même, une variation donnée de la concentration d'équilibre correspond à une désorption bien plus grande d'ions PO_4.

La cinétique de la dilution isotopique est comparable à celle que l'on observe chez la kaolinite : deux phases différentes se distinguent nettement. Il existe également une relation marquée entre la vitesse de la dilution isotopique et le travail nécessaire pour obtenir la désorption des ions PO_4 dans le milieu considéré (graphique 17). On n'observe encore aucune relation entre la vitesse de dilution isotopique et l'activité de désorption (graphique 18).

IV. — Conclusions.

L'adsorption des ions phosphoriques par ces argiles calciques est très énergique ; la désorption n'est totale que dans des solutions d'équilibre extrêmement diluées. La réaction d'adsorption sur la kaolinite est exothermique, la chaleur d'adsorption augmentant lorsque la quantité adsorbée diminue.

La dilution isotopique des ions PO_4 adsorbés s'effectue selon deux phases bien distinctes, dont les cinétiques sont très différentes. La première phase, très rapide, semble correspondre à la dilution des ions PO_4 retenus dans l'atmosphère ionique qui entoure les particules d'argile, et la seconde phase lente à la dilution des ions retenus à la surface des réseaux cristallins. La cinétique de la dilution isotopique est comparable à la cinétique de la désorption : le temps nécessaire à l'obtention des deux équilibres est sensiblement le même.

La vitesse de dilution isotopique n'est définie que pour un rapport argile/solution déterminé, de même que la vitesse de désorption. Elle ne dépend pas de l'activité à laquelle les ions PO_4 sont susceptibles de se désorber, ni, semble-t-il, de la valeur absolue de leur activité dans le système. Cette vitesse est plutôt une fonction du travail de désorption, c'est-à-dire du rapport entre l'activité a_i des ions ($^{32}PO_4 + {}^{31}PO_4$) de la solution et l'activité a_x à laquelle se désorberaient les ions qui se diluent isotopiquement. Ce fait est important dans l'étude des sols, où la valeur de a_i est bien définie.

RÉSUMÉ

L'adsorption et la désorption des cations et des ions PO_4 par des argiles pures ont été étudiées dans des conditions voisines de celles que l'on rencontre dans les sols, notamment en ce qui concerne les concentra-

tions des solutions en équilibre avec l'adsorbant, et leur force ionique. Ces énergies d'adsorption sont dans l'ensemble assez peu élevées. Les chaleurs d'adsorption $\Delta\overline{L}$, déduites de l'action de la température sur les équilibres, sont de l'ordre de — 500 à — 10 000 calories par ion-gramme ; elles varient souvent selon le degré de saturation de l'argile en l'espèce ionique considérée.

Lorsque l'on modifie extrêmement peu les équilibres, c'est-à-dire lorsque l'on réalise l'adsorption ou la désorption de quantités infiniment petites d'ions, il n'y a pas de variation mesurable des caractéristiques énergétiques, donc, en première approximation, pas de travail fourni ou reçu. Il n'en est plus de même si l'on envisage des états d'équilibre différents.

A toute quantité d'ions adsorbés correspond, à une température donnée, une activité bien déterminée des ions dans la solution en équilibre avec l'adsorbant. Une isotherme d'adsorption représente une suite d'états d'équilibres, caractérisés notamment par des activités différentes des ions en solution. Si les adsorptions et désorptions sont réalisées dans des solutions de force ionique constante, les rapports de concentrations ioniques à l'équilibre sont égaux aux rapports d'activité et indiquent les différences $\Delta\overline{G}$ d'enthalpie libre partielle molaire. On peut ainsi, à l'aide d'expériences assez simples, mesurer les variations d'activité et d'enthalpie libre qui accompagnent l'adsorption. De même, il est possible d'évaluer le travail qu'il faudrait fournir aux ions adsorbés pour obtenir leur désorption à une activité donnée, par exemple celle qui correspond à la saturation de l'argile. Cette caractéristique, qui représente l'énergie libre d'adsorption, est appelée « travail de désorption ». Mieux que la chaleur d'adsorption, le travail de désorption rend compte de l'affinité du colloïde pour les ions en fonction de son degré de saturation. Il donne également une indication de la mobilité des ions adsorbés.

La mobilité des ions PO_4 est avantageusement étudiée en mesurant la vitesse de leur dilution isotopique. Celle-ci est une fonction inverse, assez bien définie, du travail de désorption. La cinétique de la dilution isotopique et celle de la désorption sont comparables ; ni l'une, ni l'autre ne dépendent beaucoup de la valeur absolue de l'activité des ions PO_4., elles sont surtout fonction du travail de désorption. La dilution isotopique présente deux phases bien distinctes ; la première phase très rapide paraît correspondre à la dilution isotopique des ions PO_4 retenus dans l'atmosphère ionique qui entoure les particules d'argile, la seconde phase lente à la dilution des ions PO_4 adsorbés à la surface des particules.

Les phénomènes d'adsorption se manifestent très différemment selon la nature des argiles, et leur capacité d'échange d'ions. Sur la kaolinite, cas le plus simple, l'adsorption suit un processus régulier et homogène. Les phénomènes sont plus complexes chez la montmorillonite,

notamment à l'égard des ions K^+. La capacité d'échange d'ions de cette argile étant beaucoup plus élevée, la quantité de cations ou d'ions PO_4 qu'elle libère au cours d'une variation donnée d'activité est environ dix fois plus grande que dans le cas de la kaolinite. De même, lorsque l'on fournit par ion-gramme un même travail, la quantité d'ions désorbés à partir de la montmorillonite est beaucoup plus importante.

L'application aux sols de ces mesures d'énergies d'adsorption sera envisagée dans un prochain mémoire.

SUMMARY

The energy of adsorption of mineral ions by soil colloids, and the nutrition of plants

The adsorption and release of cations and PO_4 ions by pure clays were studied under conditions usually encountered in soils in respect of the concentration of solutions in equilibrium with the adsorbant and in respect of the ionic forces. The energies of adsorption are generally quite low. The heat of adsorption ΔL, calculated from the effects of temperature on the equilibria, is of the order of — 500 to — 10.000 calories per ion-gram ; it often varies with the degree of saturation of the clay with a given ion.

If the equilibria are changed only very slightly, that is if adsorption and release of extremely small amounts of ions are realized, no measurable variations in the energy characteristics occur and forces expended or used are more or less absent. The situation is quite different with different states of equilibria.

For any amount of adsorbed ions there is, at a given temperature, a well-defined activity of ions in the solution that is in equilibrium with the adsorbant. An isotherm of adsorption represents a sequence of equilibrium states, characterized especially by the different activities of ions in solution. If adsorption and release take place in solutions of a constant ionic force, the ratios of ion concentrations to equilibria are the same as the ratios of activity and they indicate the differences ΔG of the free molar enthalpy. Thus, it is possible to measure by means of quite simple experiments the variations in activity and in free enthalpy accompanying the adsorption. Similarly, it is possible to estimate the force required for the release of adsorbed ions at a given activity, e. g. at saturation of the clay. This characteristic, which represents the free energy of adsorption, is called force of desorption. The force of desorption gives a better picture than the heat of adsorption of the affinity of a colloid to the ions, in function of its degree of saturation ; it also provides an indication of the mobility of adsorbed ions.

The mobility of PO_4 ions is best investigated by measuring the rate of their isotopic dilution. The latter shows a well-defined inverse relationship with the force of desorption. The cinetics of isotopic exchange is similar to that of desorption and the two are comparable ; neither of them shows a great dependance on the absolute value of PO_4-ion activity and both of them rather depend on the force of desorption. The isotopic dilution exhibits two distinct phases : the first rapid phase seems to correspond to the isotopic dilution of PO_4 ions retained in the ionic atmosphere surrounding the clay particles,

while the second slow phase corresponds to the dilution of PO_4 ions adsorbed on the surface of particles.

Adsorption phenomena greatly differ according to the nature of clays and their ion-exchange capacities. On kaolinite, the simplest case, the process of adsorption follows a regular and homogenous course. The adsorption process, especially in respect of K^+ ions, is more complex with montmorillonite. Since the exchange capacity of this clay is much higher, the amounts of cations or PO_4 ions released during a given variation in activity are about ten times higher than those from kaolinite. Given the same force per ion-gram, the amounts of released ions are also much greater with montmorillonite than with kaolinite.

The application of these adsorption-energy measures to soils will be discussed in a following paper.

ZUSAMMENFASSUNG

Energie der Sorption von Mineralionen durch die Bodenkolloiden und Mineralernährung der Pflanzen

Die Adsorption und die Desorption der Kationen und der PO_4 Ionen durch reine Tone wurden unter den im Boden herrschenden Bedingungen untersucht, speziell was die Konzentrationen der im Gleichgewicht mit dem Sorptionskörper stehenden Lösungen und ihre ionische Kraft betrifft. Diese Adsorptionsenergien sind meistens ziemlich gering. Die von der Wirkung der Temperatur auf die Gleichgewichte abgeleiteten Adsorptionswärmewerte ΔL haben eine Grössenordnung von -500 bis-10.000 Calorie pro Grammion ; sie ändern sich oft je nach dem Sättigungsgrad des Tones in einer bestimmten Ionenart.

Wenn die Gleichgewichte äusserst wenig verändert werden, d.h. wenn eine Adsorption oder eine Desorption sehr kleiner Ionenmenge zu Stande kommt, gibt es keine messbaren Ænderungen der Energiecharakteristiken, also, in erster Annäherung, weder gegebene noch erhaltene Arbeit. Dies ist aber nicht mehr der Fall wenn man verschiedene Gleichgewichtsstadien betrachtet.

Jeder sorbierten Ionenmenge entspricht, bei einer bestimmten Temperatur, eine ganz bestimmte Aktivität der im Gleichgewicht mit dem Sorptionskörper in der Lösung befindlichen Ionen. Eine Adsorptionsisotherme stellt eine Folge Gleichgewichtsstadien dar, die durch verschiedene Aktivitäten der in Lösung befindlichen Ionen charakterisiert sind. Wenn die Adsorptions - und Desorptionsvorgänge in Lösungen mit konstanter Ionenkraft ablaufen, sind die Ionenkonzentrationsverhältnisse beim Gleichgewicht gleich den Aktivitätsverhältnissen und geben die Unterschiede ΔG der freien molaren Enthalpie an. Man kann somit, durch ziemlich einfache Versuche, die Ænderungen der Aktivität und der freien Enthalpie die bei der Adsorption stattfinden, messen. Ebenso, ist es möglich die Arbeit auszurechnen, die man den adsorbierten Ionen liefern müsste um ihre Desorption bei einer bestimmten Aktivität zu erreichen, zum Beispiel, die welche der Sättigung des Tones entspricht. Diese Charakteristik, die die freie Adsorptionsenergie darstellt, wird « Desorptionsarbeit » genannt. Die Desorptionsarbeit wiederspiegelt besser als die Adsorptionswärme, die Ionenaffinität des Kolloids

in Abhängigkeit zu seinem Sättigungsgrad. Sie bildet auch eine Angabe über die Beweglichkeit der sorbierten Ionen.

Die Beweglichkeit der PO_4-Ionen ist vorteilhafterweise durch die Geschwindigkeit der Isotopenverdünnung bestimmt. Diese ist eine entgegengesetzte Funktion der Desorptionsarbeit. Die Kinetik der Isotopenverdünnung und die der Desorption sind vergleichbar ; weder die eine, noch die andere hängen stark von dem absoluten Wert der PO_4-Ionenaktivität ab, sie sind vor allem eine Funktion der Desorptionsarbeit. Die Isotopenverdünnung zeigt zwei ganz unterschiedliche Phasen ; die erste sehr kurzfristige Phase entspricht anscheinend der Isotopenverdünnung der in der Ionenatmosphäre der Tonkriställchen zurückgehaltenen PO_4-Ionen, die zweite langfristige Phase der Verdünnung der an der Oberfläche der Kriställchen sorbierten PO_4-Ionen. Die Sorptionsvorgänge sind je nach dem Tonmineraltyp und der Ionenaustausch-kapazität desselben sehr verschieden. Bei Kaolinit, dem einfachsten Fall, ist die Adsorption regelmässig und homogen. Die Prozesse sind verwickelter bei Montmorillonit, besonders mit K^+-Ionen. Da die Ionenaustauschkapazität dieser Tonart weit grösser ist, ist die bei einer bestimmten Aktivitätsänderung ansgetauschte Kationen — und PO_4-Ionenmenge ungefähr zehnmal grösser als bei Kaolinit. Wenn pro Grammion die selbe Arbeit geleistet wird, ist ebenso die desorbierte Ionenmenge weit grösser bei Montmorillonit.

Die Anwendung dieser Adsorptionsenergiemessungen bei Böden ist in einer nächsten Denkschrift vorgesehen.

Энергия адсорбции минеральных ионов почвенными коллоидами и минеральное питание растений.

Р. БЛЯНШЭ.
Центральная агрономическая станция. Версаль.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Адсорбция и десорбция катионов и ионов PO^4 чистыми глинами изучались в условиях близких к тем, что встречаются в почвах, в особенности что касается концентраций растворов находящихся в равновесии с адсорбирующим веществом, и их ионической силы. Эти энергии адсорбции, вообще, незначительны. Теплоты адсорбции ΔL, определенные изучением действия температуры на равновесия, заключаются в пределах от — 500 до — 10.000 калорий на ион-грамм; часто они изменяются в зависимости от степени насыщения глины данным ионом.

Когда изменяют равновесия чрезвычайно слабо, то-есть, когда производят адсорбцию и десорбцию чрезвычайно малых количеств ионов, нет измеряемых изменений энергетических характеристик, следовательно, в первом приближении, нет работы данной или полученной. Но дело обстоит иначе, если рассматриваются различные состояния равновесий.

Каждому количеству адсорбированных ионов соответствует, при данной температуре, точно определенная деятельность ионов в растворе, находящемся в равновесии с адсорбирующим веществом. Ряд состояний равновесий, характеризующихся как-раз различными деятельностями ионов раствора, может быть представлен некоторой изотермой адсорбции. Если адсорбции и десорбции произведены в растворах постоянной ионной силы, отношения ионных концентраций находящихся в состоянии равновесия равны отношениям деятельности и указывают разности ΔG свобод-

ной частичной молекулярной энтхальпии (enthalpie). Таким образом можно, при помощи довольно простых опытов, измерять изменения деятельности и свободной энтхальпии сопровождающие адсорбцию. Равным образом, можно определить ту работу, что следовало бы вложить адсорбированным ионам, чтобы вызвать их десорбцию при некоторой данной деятельности, например, той, которая соответствуем насыщенности глины. Эта характеристика, представляющая свободную энергию адсорбции, названа «работа десорбции» («travail de désorption»). Работа десорбции позволяет судить лучше чем теплота адсорбции о сродстве коллоида и ионов, в зависимости от степени его насыщенности. Она дает, равным образом, указание насчет подвижности адсорбированных ионов.

Подвижность ионов PO^4 изучается в выгодных условиях измерением скорости их изотопического разбавления. Она является обратной функцией, достаточно хорошо определенной, работы десорбции. Кинетика изотопического разбавления и кинетика десорбции могут сравниваться; ни та, ни другая не сильно зависят от абсолютной величины деятельности ионов PO^4, они являются главным образом функцией работы десорбции. Изотопическое разбавление представляет две хорошо отличаемые фазы; первая фаза, очень быстрая, соответствует повидимому изотопическому разбавлению ионов PO^4, удержанных в ионной атмосфере, окружающей частицы глины; вторая фаза, медленная, соответствует разбавлению ионов PO^4, адсорбированных поверхностью частиц.

Явления адсорбции проявляются очень разно в зависимости от природы глины и ее способности к обмену ионов. Адсорбция на каолинит — случай наиболее простой — следует процессу правильному и однородному. Явления более сложны у Монтмориллонита, в особенности по отношению к ионам K^+. Способность этой глины к ионному обмену будучи значительно более высокой, количество катионов или ионов PO^4, которое она освобождает в течение данного изменения деятельности, около десяти раз более значительно, чем в случае каолинита. Равным образом, когда дается на каждый ион-грамм равная работа, количество десорбированных Монтмориллонитом ионов является гораздо более значительным.

Применение этих измерений энергий адсорбции к почвам будет, по всей вероятности, изложено в следующей работе.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) A. Demolon. — La Dynamique du sol, Dunod, Paris, p. 389-406, 1952.
(2) Barbier (G.), Lesaint (M.), Tyszkiewicz (E.). — Recherches au moyen d'isotopes sur les phénomènes d'autodiffusion dans le sol et sur l'alimentation des plantes. *Ann. Agr.*, **6**, p. 923-959, 1954.
(3) Marshall (C. E.). — The colloid chemistry of the silicate minerals, *Academie Press*, New-York, 195 p., 1949.
(4) Demolon (A.). — *Loc cité*, p. 283-406.
(5) Broyer (T. C.). — The nature of the process of Inorganic Solute Accumulation in Roots, in Mineral Nutrition of Plants. Univ. Wisconsin,Press, p. 187-250, 1953.
(6) Robertson (R. N.). — Inorganic Plant Nutrients. *Ann. Rev. of Plant physiol.*, **2**, p. 1-24, 1951.
(7) Overstreet (R.) and Jocobson (L.). — Mechanism of ion absorption by roots. *Ann. Rev. of Plant Physiol.*, **3**, p. 189-206, 1952.
(8) Epstein (E.). — Mineral nutrition of Plants, mechanisms of uptake and transport. *Ann. Rev. of Plant Physiol.*, **7**, p. 1-24, 1956.

(9) DEMOLON (A.). — Croissance des végétaux cultivés, Dunod, Paris, p. 115-280, 1950.
(10) JAVILLIER (M.). — Les éléments chimiques et le monde vivant. Flammarion, Paris, p. 161-212, 1952.
(11) MAUME (L.) et DULAC (J.). — Le problème de la toxicité et de l'Antagonisme en Physiologie Végétale. *Ann. Agr.*, **4**. p. 400-443, 1929.
(12) HOMES M. V.). — L'alimentation minérale des plantes et le problème des engrais chimiques. Masson, Paris, p. 140, 1953.
(13) WALLACE (T.). — Mineral Deficiencies in Plants, H. M. Stationery Office, London, 107 p., 1951.
(14) MC ELROY (W. D.) and NASON (A.). — Mechanism of action of Micronutrients elements in enzyme systems, *Ann. Rev. of Plant Physiol.*, **5**, p. 1-30, 1954.
(15) ARNON (D. I.). — Growth and Function as Criteria in Determining the essential Nature of inorganic Nutrients, in Mineral Nutrition of Plants, Univ. Wisconsin, Press, p. 313-341, 1953.
(16) STEINBERG (R. A.). — Correlations between Protein Carbohydrate Metabolism and mineral deficencies in plants, in Mineral Nutrition of Plants, Univ. Wisconsin, Press, p. 359-386, 1953.
(17) GAUCH (H. G.). — Mineral Nutrition of Plants. *Ann. Rev. of Plant Physiol.*, **8**, p. 31-64, 1957.
(18) LAVOLLAY (J.). — Trois aspects de la nutrition minérale. *Bull. Soc. Franc. de Physiol. Vég.*, **3**, p. 67-74, 1955.
(19) BLANC AICARD (D.). — Études préliminaires sur l'adsorption radiculaire des cations, *Ann. Agro.*, **4**, p. 615-633, 1955.
(20) BRIGGS (G. G.) and ROBERTSON (R. N.). — Apparent Free Space, *An. Rev. of Plant Physiol.*, **8**, p. 11-30, 1957.
(21) LUNDEGARDH (H.). — An electro chemical theory of salt absorption and Respiration, *Nature*, 143, p. 203 1939 ; *Physiol. Plantarum*, 1950, III, **2**, p. 103-151, 1950.
(22) EPSTEIN (E.) and HAGEN (C. E.). — A Kinetic study of the absorption of alkali cations by barley roots, *Plant Physiol.*, **27**, p. 457, 1952.
(23) EPSTEIN (E). — Mechanism of ion absorption by roots. *Nature*, 171, p. 83, 1953.
(24) EPSTEIN (E.) et HENDRICKS (S. B.). — Absorption et transport des éléments minéraux dans les racines des plantes. *Utilisation de l'Energie Atomique*, **12**, p. 112-117, 1955.
(25) SCOTT RUSSEL (R.) and AYLAND (M. J.). — Exchange reactions in the entry of cations into plant tissues, *Nature*, 4448, p. 204, 1955.
(26) BIDDULPH (O.). — The translocation of minerals in plants, in Mineral nutrition of plants. *Univ. Wisconsin, Press*, p. 261-274, 1953.
(27) DEMOLON (A.). — La dynamique du sol. Dunod, Paris, p. 113-184, 1952.
(28) DUCLAUX (J.). — Colloïdes et gels. Gauthier-Villars, Paris, p. 16-19, 1953.
(29) HENIN (S.). — Structure et propriétés physico-chimiques des argiles. *Bull. Ass. Fr. Etude du Sol*, **67**, p. 218-222, 1955.
(30) FRIPIAT (J. J.), GASTUCHE (M. C.) et VANCOMPERNOLLE (G.). — Les groupes hydroxyles de surface de la kaolinite et sa capacité d'échange ionique. C. R. Ve Congrès Intern. Sc. du Sol. Leopoldville, vol. II, p. 401-422, 1954.
(31) WEY (R.). — Étude de la rétention des anions phosphoriques par les argiles : Montmorillonite et Kaolinite. Ann. I. N. R. A., *Ann. Agr.*, **1**, p. 1-62, 1956.
(32) WAKSMAN (S. A.). — *Soil microbiology*, John Wiley, New-York, p. 124-148, 1952.
(33) CHAMINADE (R.). — Les formes du phosphore dans le sol ; nature et rôle des complexes phospho-humiques. *Ann. Agro.*, 1, p. 1-53, 1944.

(34) CHAMINADE (R.). — La rétrogradation du potassium dans les sols. *Ann. Agro.*, **6**, p. 818-830, 1936.
(35) CHAMINADE (R.). — Le potassium dans le sol. Bull. Techn. d'Inf. des I. S. A 81, p. 535-538, 1953.
(36) SCHUFFELEN (A. C.) and V. D. MAREL (H. W.). — Potassium fixation in soils. Potassium Symposium. Institut International de la Potasse. Berne, p. 157-201, 1955.
(37) CHAMINADE (R.). — Fixation de l'ion NH_4 par les colloïdes du sol sous forme non échangeable. *C. R. Ac. Sc.*, **210**, p. 264, 1940.
(38) BARBIER (G.), CHABANNES (J.) et TYSZKIEWICZ (E.). — Quelques aspects généraux du problème des fumures phosphatées. Bull. Techn. d'Inf. des I. S. A., **81**, p. 521-529, 1953.
(39) BARBIER (G.). CHABANNES (J.) et MIALLET (P.). — Absorption des ions phosphoriques à la surface des colloïdes argileux par l'intermédiaire des alcalino-terreux, *Ann. Agr.*, **1**, p. 7-33, 1946.
(40) CHAMINADE (R.) et BLANCHET (R.). — Recherches sur le rôle de la matière organique dans la fertilité des sols. *Ann. Agr.*, 3, p. 399-409, 1953.
(41) CHAMINADE (R.). — Le potassium et la matière organique. Potassium Symposium, Institut International de la Potasse. Berne, p. 203-214, 1955.
(42) BLANCHET (R.). — Influence des colloïdes humiques sur différentes phases de l'absorption des éléments minéraux par les plantes. *C. R. Ac. Sc.*, 244, p. 2418-2420, 1957.
(43) GARAUDEAUX (J.), BARRY (L.) et QUIDET (P.). — Etude sur la dynamique de la potasse des sols par microcultures successives de ray-grass d'Italie ; Étude sur l'utilisation par microcultures de ray-grass de la potasse apportée sous forme de fumure anciennes ou récentes. C. R. VIe Congrès International de la Science du Sol. Paris, Vol. D., p. 131-144, 1956.
(44) DEMOLON (A.) et BARBIER (G.). — Contribution à l'étude de l'évolution des phosphates solubles dans les sols minéraux. *Ann. Agr.*, 3, p. 329-363, 1930.
(45) DEMOLON (A.), BOISCHOT (P.) et LAJON (J.). — Réaction des divers sols à l'apport des engrais phosphatés solubles, son importance dans l'établissement des fumures. *Ann. Agro.*, **3**, p. 291-330, 1953.
(46) DEAN (L. A.). — Application des radioisotopes à l'étude du sol et des engrais : vue d'ensemble de la question. *Util. Energie Atomique*, XII, p. 103-112, 1955.
(47) NYE (P. H.) and FOSTER (W. N. M.). — Do plants vary in ther ability to utilize less readily available soil phosphate ? C. R. VIe Congr. Int. Sc. Sol., Paris, Vol. D, p. 257-262, 1956.
(48) BARBIER (G.). — Introduction à l'étude des phosphates du sol. C. R. VIe Congr. *Int. Sc. Sol.*, Paris, Vol. B, p. 387-402, 1956.
(49) TENDILLE (C.), GRENIER DE RUERE (J.) et BARBIER (G.). — Echanges isotopiques du potassium peu mobile des sols. *C. R. Ac. Sc.*, **243**, p. 87-89, 1956.
(50) RUSSEL (R. S.), RUSSEL (E. W.), MARAIS (P. G.) et FOSTER (W. N. M.). — Facteurs influençant l'assimilabilité de l'acide phosphorique des sols par les plantes. *Util. Energie Atomique*, t. XII, p. 118-123, 1955.
(51) MAUME (L.). — Le contrôle biochimique de l'alimentation de la vigne : diagnostic foliaire. *Bull. Techn. d'Inf. des I. S. A.*, **156**, p. 75-78, 1951.
(52) MAUME (L.). — Sur le contrôle biochimique de la nutrition des plantes cultivées. *Bull. Techn. d'Inf. des I. S. A.*, 81, p. 487-494, 1953.
(53) WALLACE (T.). — Methods of diagnosing the mineral status of plants, analyse des plantes et problème des fumures minérales. I. R. H. O. Paris, p. 13-22, 1956 , ainsi que l'ensemble des rapports présentés aux colloques organisés par l'Institut de Recherches pour les Huiles et Oléagineux : — Analyses des plantes et problèmes des engrais minéraux.

Paris, 198 p., 1954. — Analyses des plantes et problèmes des fumures minérales. Paris, 410 p., 1956, (publiés par l'I. R. H. O.).
(54) MAUME (L.) et DULAC (J.). — Acide phosphorique « présumé assimilable » et acide phosphorique réellement assimilé des sols à vigne. *C. R. Ac. Sc.*, **228**, p. 944-946, 1949.
(55) DEMOLON (A.). — La dynamique du sol. Dunod, Paris, p. 322-351, 1952.
(56) OVERSTREET (R.) and DEAN (L. A.). — The Availability of Soil Anions in Mineral Nutrition of Plants. Univ. Wisconsin, press, p. 79-105, 1953.
(57) JENNY (H.). — Contact Phenomena between Adsorbent and ther significance in plant nutrition, in mineral nutrition of plants. Univ. WISCONSIN, Press, p. 107-132, 1953.
(58) PASCAL (P.). — Chimie Générale. Masson, Paris, t. II, p. 54-64, 1950.
(59) EMSCHWILLER (G.). — Chimie Physique, Presses Univ. de France, Paris, t. II, p. 795-839, 1951.
(60) DANIELS (F.) et coll. — Experimental Physical Chemistry, Mc Graw Hill Book Company. New-York, p. 224-233, 1956.
(61) DUCLAUX (J.). — Colloïdes et gels. Gauthiers-Villars, Paris, p. 152-161, 1953.
(62) MOREL (R.). — Etude expérimentale des phénomènes d'échange sur différents minéraux argileux. *Ann. Agr.*, 1, p. 5-90, 1957.
(63) DARMOIS (E.). — Electrochimie, in Handuch der Physick, SpringerVerlag, Berlin, XX, p. 456-465, 1956.
(64) WIKLANDER (L.). — Cation and anion exchange phenomena, in Chemistry of the soil, Reinhold Publishing Corporation, New York, p. 107-148, 1955.
(65) DARMOIS (E.). — Electrochimie. *loc. cit.*, p. 408-425.
(66) PASCAL (P.). — Chimie Générale, Masson, Paris, t. III, p. 331-372, 1950.
(67) EMSCHWILLER (G.). — *loc. cit.*, t. II, p. 570-589.
(68) HARNED (H. S.) and OWEN (B. B.). — The physical chemistry of electrolytic solutions, Reinhold Publishing Corporation. New-York, p. 1-16, 1950.
(69) HARNED (H. S.) and OWEN (B. B.). — *loc. cit.*, p. 314-316.
(70) CHAUSSIDON (J.). — Sur les potentiels de membranes échangeuses d'ions ; méthode de mesure des activités ioniques. *C. R. Ac. Sc.*, **244**, p. 2798-2800, 1957. Sur les potentiels plurioniques de membranes. *C. R. Ac. Sc.*, **245**, p. 305-307, 1957.
(71) MARSHALL (C. E.). — The activities of cations held by soils colloids and the chemical environment of plant roots, in Mineral Nutrition of Plants, Univ. Wisconsin. Press, p. 57-77, 1953.
(72) OVERSTREET (R.) et BABCOCK (K. L.). — Sur la définition de l'activité. Congrès Int. Sc. Sol. Paris, en cours d'impression.
(73) TRAVERS (A.). — L'Atome et la valence, Vuibert, Paris, 208, p., 1950.
(74) DARMOIS (E.). — Thermodynamique et rayonnement. S. E. D. E. S. Paris, 159 p., 1947.
(75) EMSCHWILLER (G.). — Chimie physique, Presses Universitaires deFrance, t. I, 440 p., 1951.
(76) ANTIPOV KARATOEV (I. N.). — Emploi de la méthode isotopique pour l'étude des phénomènes d'adsorption des électrolytes par les sols aux fins d'amélioration des sols. Util. *Energie Atomique*, t. XII, p. 147-155, 1955.
(77) WURMSER (R.). — Cinétique des réactions biochimiques. C. D. U., p. 1-30, 1949.
(78) COMAR (C. L.). — Radioisotopes in Biology and Agriculture. Mc Graw Hill Book Company. New York, p. 481, 1955.
(79) BARBIER (G.) et QUILLON (P.). — Dissolution de phosphates peu solubles en présence d'un échangeur d'anions, étudiés par dilution isotopique. *Util. Energie Atom.*, t. XII, p. 255-256, 1955.

(80) MERING (J.), MATHIEU-SICAUD (A.) et PERRIN-BONNET (I.). — Observation au microscope électronique de montmorillonite saturée par différents cations. 4e *int. Cong. Soil Sc.* Amsterdam, vol. III, p. 29-32, 1950.
(81) FRIPIAT (J. J.) et GASTUCHE (M. G.). — Etude physicochimique de la surface des argiles. Public. I. N. E. A. C., 54, 60 p., 1952.
(82) HENDRICHS (J. B.) and DYAL (R. S.). — Surface measurement for ethylene glycol retention of clays and its application for potassium fixation. 4e *Int. Cong. Soil Sc.* Amsterdam, II, p. 71-72, 1950.
(83) ESCARD (J.). — Adsorption de l'azote à basse température par la montmorillonite ; influence de l'eau résiduelle et des cations échangeables. 4e *Int. Congr. Soil Sc.* Amsterdam, III, p. 71-74, 1950.
(84) BERGNA (H. E.). — Electrokinetic of clay minerals. 4e *Int. Congr. Soil Sc.* Amsterdam, III, p. 75-80, 1950.
(85) JURINAK (J. J.) and BAUER (N.). — Thermodynamics of zinc adsorption on Calcite, Dolomite and magnesite-type minerals, *Soil. Sc. Soc. of Am. Proceed*, t. XX, 4, p. 466-471, 1956.
(86) AUDUBERT (R.). — Les ions en solution, P. U. F. Paris, I, 170 p., 1955.
(87) BARSHAD (J.). — Les effets des cations intercouches sur l'expension des réseaux cristallins de type mica, *Am. Miner.*, **35**, p. 225, 1950.
(88) BARSHAD (J.). — Factors effecting the iterlayer expansion of vermiculite, montmorillonite with organic substances. *Soil. Sc. Soc. of Am. Proceed*, **16**, 176-182, 1953.
(89) DEMOLON (A.). — La dynamique du sol. Dunod, Paris, p. 289, 1952.
(90) CHARLOT (G.) et BEZIER (D.). — Méthodes modernes d'analyse quantitative minérale, Masson, Paris, p. 12, 1949.
(91) SANDELL (E. B.). — Colorimetrie determination of traces of metals. Interscience Publishers, New York, p. 182-83, 1944.

ESSAI DE TRI MÉCANOGRAPHIQUE SUR LES ÉLÉMENTS DE L'ANALYSE PHYSIQUE DES SOLS DU PLATEAU PICARD DE L'OISE

PAR

G. LEFÈVRE et P. LEFÈVRE (1)
Station d'Agronomie, Amiens.

En 1954, P. TROUSSEAU, Ingénieur du C. E. T. A. de Ham-Vermandois, effectuait un sondage au sein de son C. E. T. A. sur les conditions de culture de la betterave sucrière. P. H. ADMONT, Ingénieur du S. P. I. E. A. après avoir pris connaissance de ce travail, proposait d'amplifier l'enquête en utilisant les moyens mécanographiques du Comptoir de l'Azote. La prospection fut alors étendue à plusieurs C. E. T. A. et Sucreries (Ham, Albert, Senlis, Soissons, Plessis-Belleville, Cambrai) et J. P. RÉAL, Conseiller agricole de la Chambre d'Agriculture de la Somme, fournit également un certain nombre d'adhérents.

Les questionnaires portaient sur environ 1 000 pièces et représentaient 8 000 ha approximativement. Les stations agronomiques de Laon et d'Amiens étaient consultées pour recenser l'ensemble des facteurs culturaux, pouvant être étudiés dans l'enquête. Le dépouillement effectué au cours de l'année 1956 donna des résultats encourageants confirmant d'ailleurs, en les précisant parfois, les observations recueillies par JORET et MALTERRE au cours d'une longue expérimentation. Les conclusions retenues avaient trait surtout à l'influence de facteurs culturaux tels que, époque de labour, densité de semis, date de démariage, date de récolte, etc. L'action des fumures azotées était entrevue, mais celle de la fumure phosphopotassique ne pouvait être interprétée par suite de la grande diversité relevée dans la nature et la richesse, naturelle ou acquise, des sols ; c'est dire que l'enquête telle qu'elle était conduite ne permettait pas de répondre à la question principale qui était posée, à savoir, l'influence de l'ensemble et de chacun des éléments de la fumure minérale.

Cette constatation n'a pas été une découverte, mais elle a confirmé la difficulté d'une extension rapide des résultats d'essais culturaux.

(1) Les analyses utilisées dans ce mémoire ont été faites à la Station d'Agronomie d'Amiens, sur les échantillons prélevés au cours des prospections de G. JORET, J. HÉBERT et P. LEFÈVRE.

L'analyse du sol permet bien d'interpréter les résultats d'une expérimentation mais l'extrapolation des conclusions reste aléatoire dès lors même qu'un seul facteur, important, est variable. Ce premier travail cependant, nous a permis d'apercevoir toutes les possibilités du tri mécanographique dans ce domaine expérimental, caractérisé par le nombre de ses éléments variables, mais relativement peu modifiables.

En 1956, il avait été convenu avec l'I. T. B., qui apportait son concours financier et technique, de reprendre, le dépouillement en multipliant les analyses de sol. Au cours d'une réunion avec J. HÉBERT nous avions décidé de codifier la nature des sols et leur richesse en éléments fertilisants. La période de restriction d'essence n'a pas permis de réaliser entièrement le programme de prospection et seuls les C. E. T. A. suivants y participèrent (Ham, Senlis, Soissons, Cambrai, Lille, Le Plessis-Belleville). Le dépouillement réalisé en 1957 s'est montré encore insuffisant.

Ces deux années, à conclusions partielles, ont mis en évidence qu'il était nécessaire de faire une enquête préliminaire et spéciale sur le sol, chaque parcelle mise en observation devant être analysée pour en connaître la richesse actuelle et le passé cultural. Ce résultat confirme que les analyses de sol, si utiles sur le plan individuel, n'ont pu jusqu'à présent, en l'absence de cartes régionales, rendre tous les services que l'on en attend implicitement. Il faut en effet trouver un moyen remplaçant une expérimentation infiniment variée, permettant d'étudier toutes les combinaisons possibles de types de sol, de richesse variable en éléments fertilisants, avec les divers types de rotation et d'entretien organique et calcique.

Ces deux années de travail mécanographique ont cependant montré que le tri était capable de clarifier cet ensemble en simplifiant considérablement la tâche de reconnaissance des types de sol, de leur caractérisation et de l'appréciation, par simple classification — donc sans interprétation — de leur richesse chimique.

Dans une présentation interne à l'I. N. R. A. de ce sujet, nous pensions que toute expérimentation culturale, sur le plan national, pourrait être accompagnée d'une fiche de sol, donnant les caractéristiques physiques et chimiques de la pièce, d'une seconde fiche de façons culturales, résumant les données relatives à la culture expérimentée mais précisant également la nature des antécédents avec leurs fumures minérales et leurs amendements, et d'une troisième fiche précisant les données climatiques de l'année de l'essai.

Au cours de ce mémoire, nous voudrions insister plus spécialement sur la fiche « Sol ».

Ne pouvant, dans une enquête, dépouiller l'effet des fumures minérales sans connaître les caractéristiques des sols étudiés, on peut en cor-

rollaire se demander si ces caractéristiques peuvent être facilement identifiées. Avec le tri mécanographique, le problème était donc de savoir si la machine pouvait « digérer » un ensemble d'analyses qu'on lui fournissait sous forme de cartes, et en premier lieu si l'on pouvait en « sortir » les types de sol.

Pour cela, nous avons utilisé un travail commencé par G. JORET en collaboration avec l'un de nous et J. HÉBERT sur les sols de l'Oise. Les analyses des échantillons recueillis au cours de la prospection de ce département portaient uniquement sur les sols de surface (0-30 cm). En utilisant les critères de différenciation des types de sol de Picardie, mis en évidence par les travaux de G. JORET et H. MALTERRE (4, 6 à 11), chaque prélèvement avait donné lieu à une interprétation précisant son type. Les sols ainsi identifiés ont été soumis au travail mécanographique, le tri s'effectuant sur les éléments de différenciation de l'analyse mécanique : cailloux, calcaire, argile, limon, sable très fin, sable fin. Au deuxième essai la trieuse a groupé tous les sols de même type.

Il est donc permis actuellement d'affirmer :

1. — Qu'il est possible de retrouver à la trieuse des types de sol par leur analyse physique, ce qui suppose que le type est défini.

2. — Qu'à l'inverse, en région non étudiée, on peut par le tri mettre en évidence des caractères communs, permettant de définir des types.

Ce travail peut paraître presque évident. Etant effectué mécaniquement, il permet cependant de résumer le résultat du classement. Chaque type, correspondant à un ensemble d'opérations systématiques, peut être par la suite codifié suivant un mode traduisant simplement les normes que l'on a imposé au type.

Par exemple, dans la région picarde, les limons *vrais* (2) seront caractérisés par les normes suivantes :

Cailloux < 25 °/₀₀	
CO_3Ca < 10 °/₀₀	
Argile > 8 — < 25 %	< 2 µ
Limon > 18 %	2 µ < — < 20 µ
Sable très fin voisin de 50 %	20 µ < — < 50 µ
Sable fin < 10 %	50 µ < — 200 µ
Sable grossier < 10 %	200 µ < — 2 mm

Cela permet d'ajouter un second repère précisant une différenciation secondaire (pour la région picarde, par exemple, teneur en argile des limons). Dans ces conditions, on est assuré d'avoir des classes de sols comparables, à l'intérieur desquelles il est encore possible de faire des divisions suivant les richesses en éléments fertilisants. La valeur absolue des teneurs peut alors servir directement d'échelle de comparaison de richesse, sans même avoir à interpréter le chiffre. Cela permet encore d'examiner l'influence des fumures minérales sur un ensemble de sols pour une culture déterminée, ou en utilisant les autres fiches d'antécédents culturaux, se rendre compte de l'influence de l'entretien passé sur

la richesse du sol. Ces problèmes ne pouvaient jusqu'à présent être étudiés que sur quelques cas isolés et il semble que l'on ait ainsi un nouveau champ d'investigations.

Nous avons déjà précisé que nos essais avaient porté sur des analyses de sol de surface (0-30 cm). En indiquant la profondeur de l'échantillon analysé, il est très possible d'associer plusieurs fiches représentant les différents niveaux et de reconstituer ainsi un profil.

Ces fiches présentent encore un autre avantage du fait qu'elles peuvent toujours être complétées. Il est désagréable de penser qu'on a pu faire une classification — certes valable au moment où elle a été faite

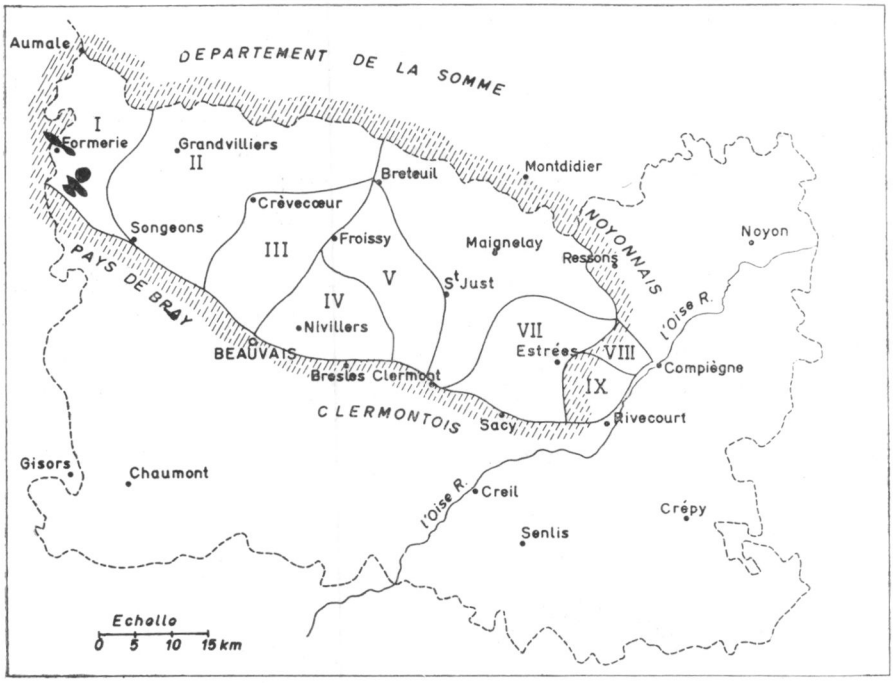


Fig. 1. — Limites et divisions en zones de la région étudiée.

— mais susceptible d'être modifiée par l'adjonction d'un caractère oublié ou actuellement inconnu. Or la fiche mécanographique permet d'ajouter à tout moment une donnée nouvelle et un passage à la trieuse donnera la classification correspondant au caractère supplémentaire fourni.

La première répartition ne sera cependant que précisée par ce tri, sans perdre de sa valeur première, si elle a été faite sur des critères dont la signification a été suffisamment contrôlée. Cela semble être le cas, pour la Picardie, de la caractérisation des types de sol par leur analyse mécanique. Par le tri mécanographique, un inventaire, en quelque sorte

automatique, des sols de cette région paraît réalisable en utilisant simplement les données actuellement fournies par l'analyse courante.

Nous allons donner, en exemple, quelques résultats obtenus par le tri mécanographique, en utilisant les données de l'analyse mécanique des sols de l'Oise. Bien qu'il s'agisse plutôt de mettre en évidence une méthode de travail, il peut être intéressant de préciser les limites de la

TABLEAU I

Exemple de classement de sols de limons suivant la teneur en argile croissante.

Nos d'analyse	Sol	Plateau picard	Zone	Formation géologique	Type de sol	Cailloux %	Argile %	Limon %	Sable Fin %	Sable grossier %	Matières organiques ‰	Co_3 Ca ‰
4970	1	1	2	47	3	1	10	28	56	1	29	0
3428	1	1	3	47	3	1	11	25	60	1	26	1
4819	1	1	2	49	3	1	12	27	56	3	28	0
4992	1	1	2	47	3	1	12	29	56	1	36	0
5235	1	1	4	47	3	1	12	26	58	1	28	0
4296	1	1	2	47	3	1	12	27	58	0	33	0
4602	1	1	3	47	3	1	13	26	57	1	26	4
4621	1	1	2	47	3	1	13	28	55	1	27	3
5234	1	1	4	47	3	1	13	25	59	1	28	0
5316	1	1	7	47	3	1	13	28	54	1	22	5
4965	1	1	2	47	3	1	13	32	51	1	32	0
4966	1	1	2	47	3	1	13	30	53	1	31	2
4620	1	1	2	47	3	1	14	27	56	1	26	3
5318	1	1	7	47	3	1	14	25	56	1	27	8
4522	1	1	7	47	3	1	15	24	56	0	26	7
4664	1	1	2	47	3	1	15	25	57	2	25	0
4828	1	1	3	47	3	1	15	29	52	2	27	0
4294	1	1	2	47	3	1	15	25	55	0	32	2
4529	1	1	7	47	3	1	16	21	59	0	28	0
4953	1	1	2	47	3	1	16	23	57	0	33	1
4608	1	1	1	47	3	2	10	24	65	1	27	0
4299	1	1	2	47	3	2	10	30	56	1	33	0
4629	1	1	2	23	3	2	11	24	62	1	30	6
4630	1	1	2	47	3	2	11	28	58	1	31	5
4833	1	1	2	47	3	2	11	21	63	1	27	2
5191	1	1	1	47	3	2	11	25	59	2	29	0
4295	1	1	2	47	3	2	11	26	57	3	35	0
4670	1	1	6	47	3	2	12	27	56	1	27	5
5230	1	1	4	47	3	2	12	25	59	1	26	0
4705	1	1	9	27	3	2	12	22	63	1	21	0
4644	1	1	3	47	3	2	13	24	59	1	24	0
5192	1	1	1	47	3	2	13	21	58	6	32	1
4824	1	1	2	47	3	2	13	23	62	1	26	0
3840	1	1	6	47	3	2	14	26	50	7	26	3
3056	1	1	5	47	3	2	14	27	56	1	25	2
5240	1	1	4	47	3	2	15	29	50	1	32	1
5314	1	1	7	47	3	2	16	26	54	0	28	2
4678	1	1	5	47	3	2	17	25	54	1	24	0
4665	1	1	2	47	3	2	18	25	53	1	30	1
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

zone prospectée par cette étude (1). Elle forme la partie méridionale du plateau picard (9). Les limites Nord et Nord-Ouest, conventionnelles, sont celles des trois départements de l'Oise, de la Somme et de la Seine-Maritime. Les autres limites sont formées par des éléments naturels : falaise septentrionale du Pays de Bray au Sud-Ouest, hauteurs et buttes du Clermontois au Sud, marais tourbeux de Sacy à Rivecourt, puis vallée de l'Oise et buttes du Noyonnais à l'Est. Cette région a été découpée en 9 zones dont les 7 premières seulement seront étudiées dans ce mémoire (fig. 1).

a) **Homogénéité des types séparés par le tri.**

La valeur du tri ne peut être appréciée qu'en recopiant une page fournie par la machine pour un type de sol pris au hasard (tableau I).

b) **Répartition des types de sols par zone.**

La reconnaissance des types par le tri a permis une codification rapide donnant à son tour aisément la répartition des types de sols par zone (opération de tri : zones-types de sols). Ce classement est résumé dans le tableau II et la figure 2 donnant le pourcentage de chaque type par rapport à l'ensemble des sols analysés dans la zone correspondante.

TABLEAU II

Pourcentage selon lequel un type de sol est représenté dans chaque zone.

Zone	Formations types								Formations remaniées			
	Argiles	Argiles à silex	Limons	Limons bief-feux	Dépôts meubles	Calcaires	Crayeux	Sables	Argiles à silex calcaires	Limons calcaires	Limons bief-feux calcaires	Sables calcaires
I	2	15	36	20	2		2	23				
II		21	33	13	2	6	5	3	12	5		
III		33	31	15,5			4,5	2,5	11	2,5		
IV		38	19	25		3		3	3	3	6	
V		39	22	6	3		6		12	9	3	
VI		12	24	12	1,5	10,8	14	3	7,6	3	4,5	7,6
VII		26	37	22					3,7	3,7		7,6

(1) Nous rappelons que la plaine d'Estrées diffère géologiquement du plateau picard (9). Elle n'a été incluse dans cette étude que pour des raisons géographiques (16).

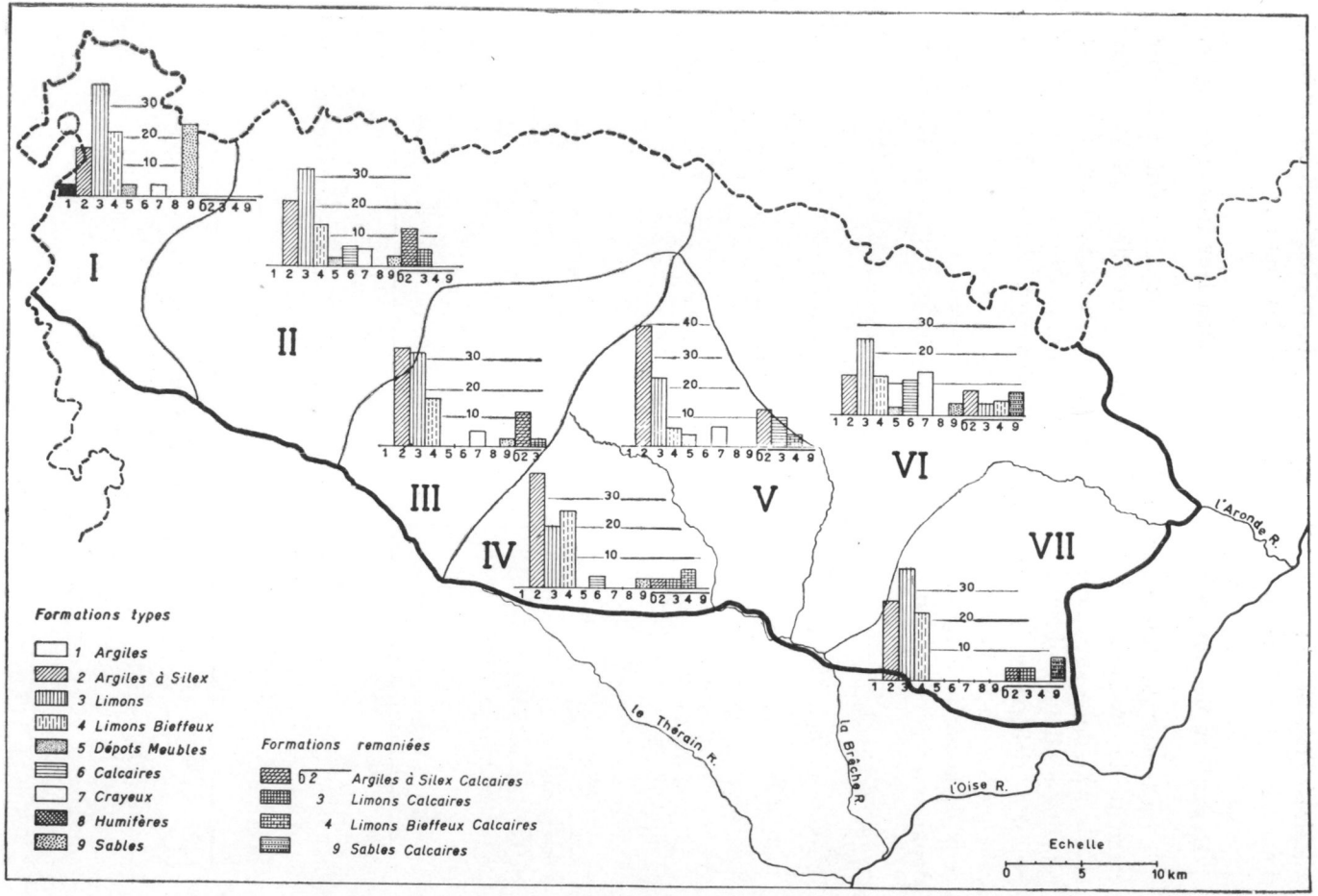


Fig. 2. — Pourcentage de répartition des types de sols dans les zones I à VII.

Il met en évidence la place prépondérante prise par les formations non calcaires, c'est-à-dire : argiles à silex, limons, limons bieffeux et les variations d'importance de chaque formation selon les zones..

c) **Répartition des formations non calcaires selon leur teneur en argile.**

La teneur des sols en argile étant un élément déterminant de leur capacité de production (5), les formations non calcaires, qui occupent la majorité de la superficie prospectée, ont été triées en fonction de leur teneur en colloïdes minéraux (tableau III) (opération de tri : zones — type de sol — richesse croissante en argile). Il en ressort d'une manière générale que les sols de la partie Ouest (zones 1 et 2) sont moins argileux que ceux de la partie Est. On retrouve ici une situation analogue à celle du département de la Somme où les limons sableux peu épais du Vimeu (8)

TABLEAU III

Nombre d'échantillons de sols non calaires ayant une teneur donnée en argile.

	Zone I	II	III	IV	V	VI	VII	Total
Sables :								
Argile : 0-25	—	—	—	—	2			2
25-50	—	1	—	1	1			3
50-75	6	1	1	2	3			13
75-100	—	1	—	—	—			1
	6	3	1	3	6			19
Limons :								
Argile : 90-100	7	1	1	—	—	3	3	15
100-125	3	16	3	2	—	4	—	28
125-150	3	13	6	4	—	6	5	37
150-175	1	5	2	2	3	2	4	19
175-250	—	2	—	—	2	7	1	12
	14	37	12	8	5	22	13	111
Limons bieffeux :								
Argile : 50-100	—	1	—	—	—	—	—	1
100-125	2	6	4	2	—	1	2	17
125-150	3	4	2	5	1	2	1	18
150-175	—	3	3	4	3	2	—	15
175-250	2	1	1	—	2	5	3	14
	7	15	10	11	6	10	6	65
Argiles à silex :								
Argile : 50-100	1	1	1	—	—	—	—	3
100-150	3	14	9	5	2	2	2	37
150-200	—	4	7	6	6	11	5	39
200-250	1	2	4	2	5	8	2	24
250-300	1	2	1	—	3	1	—	8
300-350	—	—	1	—	—	—	—	1
< 350	—	4	—	—	1	—	—	5
	6	27	23	13	17	22	9	117
Total	33	82	46	35	34	54	28	312

reposent sur argile à silex, tandis que les limons du Santerre (10) moyennement argileux ne forment que la partie supérieure, modifiée par évolution pédologique, d'un sédiment de même type.

d) **Relation entre le type de sol et la roche mère géologique.**

Cette influence du sous-sol nous a conduit à étudier la relation existant entre un type de sol et la formation géologique indiquée sur la carte à l'endroit précis du prélèvement (opération de tri : formation géologique, type de sol).

La proportion selon laquelle une formation géologique donne un type de sol défini est donnée par le tableau IV.

Il ressort de ce tableau que la proportion normale de correspondance entre le type géologique et le type agronomique pour les quatre formations régionales classiques : craie, argiles à silex, limons des plateaux, sables de Bracheux, est généralement inférieure à 50 p. 100.

Une des raisons de cette faible concordance paraît résider dans le vallonnement de cette région, se traduisant par des pentes plus ou moins fortes qui tronquent les formations et en font ainsi varier les limites réelles en remaniant les sols (15).

Ce genre de tri permet vraisemblablement de conclure de la façon suivante : quand un « limon agronomique » repose sur un « limon géologique » a_1b on peut penser qu'il est profond. Par contre, si un « limon agronomique » apparaît en un lieu où la carte géologique indique craie, sable..., il est vraisemblable que ce limon sera peu épais et partiellement dépourvu des qualités reconnues régionalement à ce type de sol.

e) **Teneur en matières organiques suivant le type de sol.**

On apprécie souvent la valeur de la teneur en matières organiques d'après la richesse du sol en argile (1). Pour comparer la richesse des différents types de sol en matières organiques, il est donc nécessaire de voir d'abord leur teneur en éléments les plus fins. Le tableau III permet facilement d'obtenir les chiffres suivants :

La teneur en argile des limons étudiés varie de 90 à 200 p. 1 000 ;

La teneur en argile des limons bieffeux varie de 100 à 250 p. 1 000 ;

La teneur en argile des argiles à silex varie de 100 à 250 p. 1 000.

Les limites ne diffèrent donc que pour les limons, un peu moins riches en colloïdes minéraux. Le dépouillement des teneurs en matières organiques, illustré par la figure 3 pour les limons, donne le résultat suivant :

Limons : 90% des teneurs en matières organiques sont compris entre .....21 et 34‰
Limons bieffeux : 75% — .....26 et 38‰
Argiles à silex : 65% — .....30 et 43‰

TABLEAU IV

Pourcentage selon lequel une formation géologique donne un type de sol déterminé

Formation géologique	Formations types								Formations remaniées					% représenté par le type dérivant normalement de la formation	
	argile	argile à silex	limon	limon biefteux	dépôt meuble	calcaire	crayeux	sable	argile à silex calcaire	limon calcaire	limon biefteux calcaire	sable calcaire	limon sableux	Formation type	Avec formation remaniée
Dépôts meubles A ou DM		21	10,5	21	**16**	10,5		5		16				16	—
Limon des plateaux a^{1b}		22	**43**	17		1,5	1	3,5	6,5	3,5	2			43	46,5
Argile plastique .. e_{1V}	**17**	15	34	18				16						17	—
Sables de Bracheux e_V		8	10	4				**11**		5		54 (2)	8	11	73
Argiles à silex AS ou ^eV_b		**40**	22,5	12		2		4	20					40	60
Craie à Balemnitelles C^8		19	10	19		**18**	**20**		14					38	—
Craie à Micraster. C^{7b} *cor anguinum*		21				**14**	**44**		14		7			58	—
Craie à Micraster. C^{7a} *cor testudinarium*		18		18		**9**	**55**							64	—

(1) Les cases en caractère gras représentent le type de sol qui doit normalement dériver de la formation géologique considérée.

(2) Il existe de bonnes raisons de penser que le calcaire renfermé par ces sols provient de marnages massifs anciens.

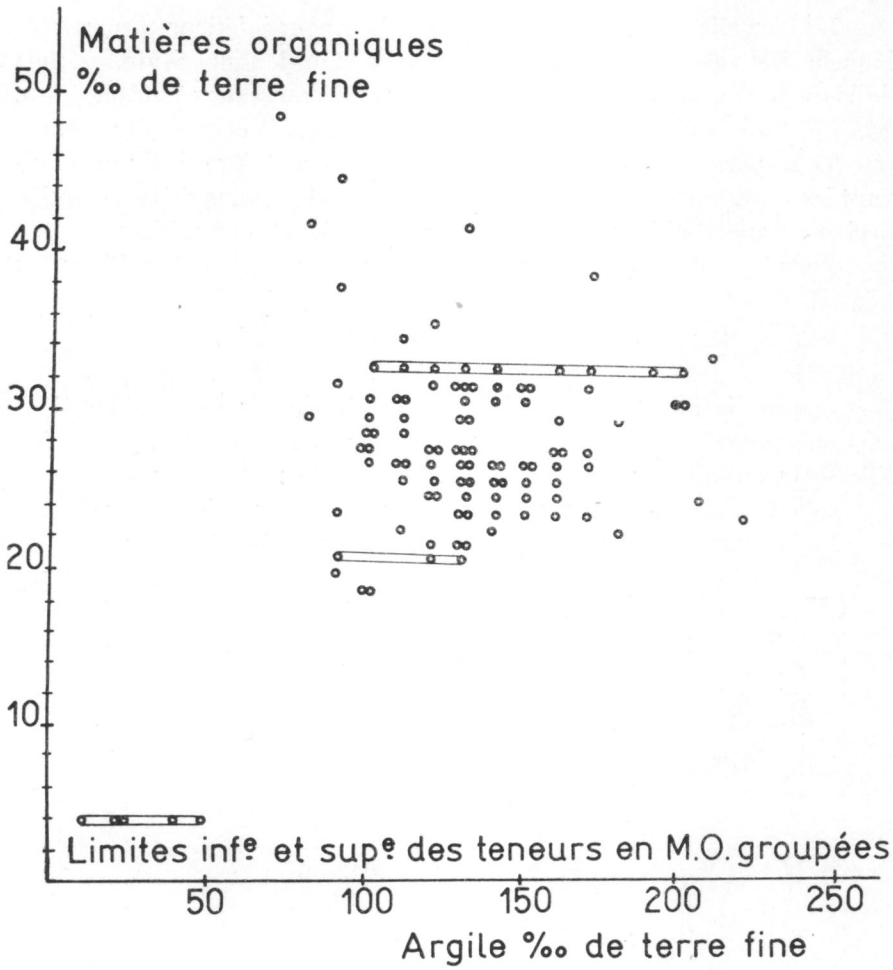


Fig. 3. — Répartition des teneurs en matières organiques en fonction de la teneur en argile dans les sols de limon.

TABLEAU V

Etendue et zones de groupement des teneurs en matières organiques.

Type de sol	Étendue des teneurs en matières organiques		
	Limite inf. M. O. p.°/₀₀ terre fine	Groupement	Limite supérieure
Sols calcaires	19	pas de groupement	70
Sols crayeux	40	groupes de 40 à 50	95
Sols sableux	21	groupes de 35 à 38	61
Argiles à silex calcaires	*34*	groupements discontinus à 37 38 40 41 *49*	64
Limons calcaires	ne forment pas de groupes		
Limons bieffeux calcaires	—		

L'intervalle, pour ces 3 types, entre la teneur inférieure à partir de laquelle les sols commencent à se grouper et celle, supérieure, au-delà de laquelle le groupement disparaît est presque constant et voisin de 13.

Les limites n'étant cependant pas les mêmes, il peut en être conclu que les normes d'interprétation de richesse doivent être différentes suivant les types surtout en ce qui concerne les sols les moins riches en argile. Ceci confirme d'ailleurs les observations de J. HÉBERT (3).

Pour les autres types les résultats sont résumés dans le tableau V :

e) **Etat calcique.**

L'appréciation de l'état calcique a été basée sur les considérations exposées précédemment (14) et sur les normes définies par G. JORET (5). Elle se traduisait par l'opération de tri suivante :

zone-type de sol-teneur croissante en argile-teneur croissante en CO_3Ca.

Les résultats sont résumés dans le tableau VI et la figure 4.

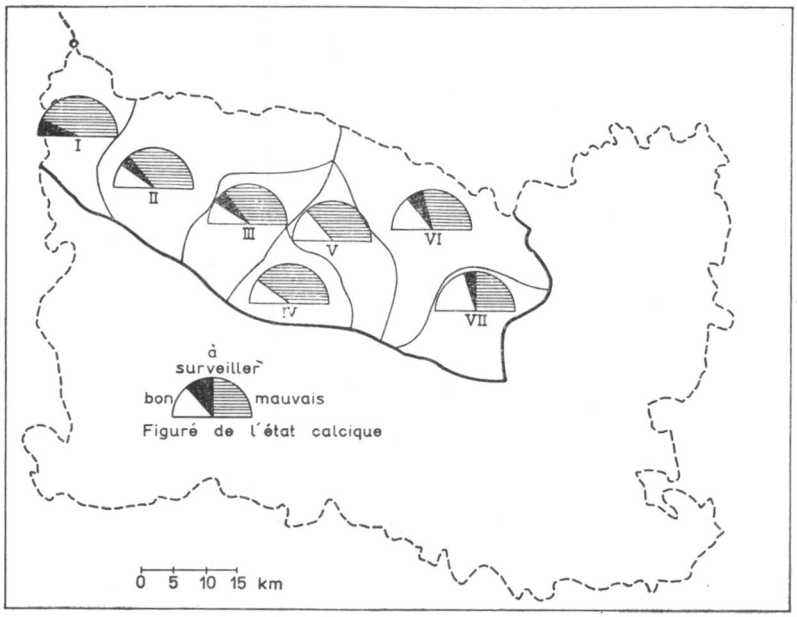


Fig. 4. — État calcique des sols non calcaires étudiés.

Il apparaît que, d'une manière générale, l'état calcique des 3 formations non calcaires est défectueux ; le pourcentage de limons décalcifiés est nettement supérieur à 50 p. 100. La région occidentale (zones 1 à 4) est spécialement décalcifiée, d'une part en raison d'une pluviométrie plus forte qui augmente le lessivage, d'autre part parce qu'elle pos-

sède peu de sucreries rapprochées, susceptibles de lui fournir sur place un tonnage important d'écumes de défécation, amendement courant de la région orientale.

TABLEAU VI

Etat calcique des 3 formations non calcaires (pourcentage).

Zones	Argiles à silex			Limons			Limons bieffeux		
	bon	mauvais	à surveiller	bon	mauvais	à surveiller	bon	mauvais	à surveiller
I	16	50	33	—	86	14	28	44	28
II	37	55	8	19	75	6	9	91	—
III	25	62	13	21	72	7	33	67	—
IV	17	75	8	16	84	—	25	62	12
V	64	27	9	28	72	—	50	50	—
VI	56	33	11	25	62	13	37	50	13
VII	14	57	29	40	50	10	67	17	16

Conclusions.

Nous avons présenté, dans ce mémoire, essentiellement un travail de tri. Il voudrait faire ressortir la facilité avec laquelle les principaux caractères fournis par l'analyse mécanique ont été dépouillés. Cela se traduit par un résultat en quelque sorte statistique de la fréquence des types de sol et de leurs propriétés.

Ce classement permet, en particulier, de préciser les limites d'une expérimentation culturale soit en choisissant *a priori* un sol bien caractéristique d'une région soit en étendant *a posteriori*, les réultats obtenus, à tous les sols de même composition et soumis aux mêmes conditions climatiques. En n'utilisant par ailleurs que les données texturales et les teneurs en matières organiques et en calcaire on a pu d'une part mettre en évidence une relation intéressante entre la richesse en matières organiques et le type de sol, et d'autre part avoir un aspect de l'état de l'entretien calcique.

Ce que nous avons ainsi résumé ne représente que le travail de base de caractérisation du type de sol, indispensable pour poursuivre l'étude avec les analyses chimiques. Il nous paraît cependant nécessaire, avant d'entreprendre cette seconde partie, de faire encore pour chaque parcelle retenue, un inventaire des façons culturales et de ses fumures. Ce genre de travail se poursuit actuellement dans la région du Nord en collaboration avec P. H. ADMONT et la Station agronomique d'Arras. Partant de la différenciation des types de sol, nous rechercherons les moyens capables de mettre en évidence l'influence des fumures, en essayant de préciser l'effet intermédiaire de la rotation et des entretiens organiques et calciques.

Mémoire envoyé le 6 septembre 1958.

RÉSUMÉ

Dans ce mémoire, les auteurs présentent un travail de tri mécanographique, qui permet d'avoir un résultat en quelque sorte statistique de la fréquence des types de sol et de leurs propriétés. Ce classement permet, en particulier, de préciser les limites d'une expérimentation culturale soit en choisissant *a priori* un sol bien caractéristique d'une région, soit en étendant *a posteriori*, les résultats obtenus, à tous les sols de même composition et soumis aux mêmes conditions climatiques. En n'utilisant par ailleurs que les données texturales et les teneurs en matières organiques et en calcaire on a pu d'une part mettre en évidence une relation intéressante entre la richesse en matières organiques et le type de sol, et d'autre part avoir un aspect de l'état de l'entretien calcique.

Ce qui est résumé ne représente que le travail de base de caractérisation du type de sol, indispensable pour poursuivre l'étude avec les analyses chimiques. Il nous paraît cependant nécessaire, avant d'entreprendre cette seconde partie, de faire encore pour chaque parcelle retenue, un inventaire des façons culturales et de ses fumures. Ce genre de travail se poursuit actuellement dans la région du Nord en collaboration avec P. H. ADMONT et la Station Agronomique d'Arras.

SUMMARY

A tri-mechanographic study of the elements of physical analysis on the soils of the Picard de l'Oise plateau

The tri-mechanographic approach yields nearly statistical data on the frequency of soil types and on their properties. The classification is particularly suitable to define the limits of a field experiment either by an *a priori* choice of a characteristic soil of the region or by an *a posteriori* extension of data to all soils of similar composition and same climatic environment. Data on soil texture and on organic-matter and calcium levels showed a significant relationship between organic-matter levels and soil types, and supplied information on the calcium status.

The results will serve as a basis for characteriying the soil types, important for a further chemical study. Before this latter study is undertaken, it seems necessary to make a survey of the cultural practices and fertilizing o n each plot investigated. Such an investigation is now being conducted in the northern region, in collaboration with P. H. ADMONT and the Agricultural station in Arras.

ZUSAMMENFASSUNG

Versuch mekanographischer Sonderung von der physikalischen Analyse stammender Elemente bei den Böden der pikardischen Hochebene der Oise

In dieser Arbeit bringen die Verfasser eine Studie über die mekanographische Sonderung die es ermöglicht ein statistisches Ergebniss über die Häufigkeit der Bodentypen und ihrer Eigenschaften zu ermitteln. Diese Klassifizierung erlaubt vor allem die Grenzen eines Versuchs zu ermitteln und dies entweder bei der Answahl eines für ein Gebiet wohl charakteristischen Bodens oder bei dem Extrapolieren der Ergebnisse auf Böden gleicher zusammensetzung und unter gleicher klimatischen Bedingungen. Bei alleiniger Benutzung der granulometrischen Zahlen und der organischen Substanz-und Kalk-Gehalte,

konnte man einerseits eine interessante Beziehung zwischen dem Humusgehalt und dem Bodentyp, andererseits einen Blick auf den Kalkzustand gewinnen.

Was kurz angegeben wird stellt nur die Basis einer Bodentypcharakterisierung dar, die aber unentberlich zur weiteren chemischen Untersuchung ist. Beror wir diesen zweiten Teil angreifen scheint es uns aber notwendig für jede behaltene Parzelle das Inventar der Anbaumassnahmen sowie der Düngungen aufzustellen. Solch eine Arbeit wird zur Zeit im « Nord » in Zusammenarbeit mit P. H. Admont und der landwirtschaftlichen Versuchsanstalt von Arras durchgeführt.

Проба механографической группировки, основанной на данных физического анализа почв плоской возвышенности Пикардии, Оазского департамента.

Ж. ЛЕФЭВР и П. ЛЕФЭВР. Амьен.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В этом труде, авторы представляют работу механографической группировки, позволяющей иметь результат, так сказать, статистический частоты почвенных типов и их свойств. Эта классификация позволяет, в частности, определить границы агрономической экспериментации или выбирая, *a priori*, почву вполне характерную некоторой области, или, пользуясь полученными результатами, применить их, *a posteriori*, ко всем почвам такого же состава и находящихся в таких же климатических условиях. Пользуясь только данными почвенного состава, содержанием органических веществ и известняка, оказалось возможным, с одной стороны, выявить интересную зависимость между содержанием органических веществ и почвенным типом и, с другой стороны, видеть состояние, в котором поддерживается уровень кальция.

Эта группировка есть только основа изучения почвенною типа, необходимая для того, чтобы продолжать изучение химическими анализами. Тем не менее, нам кажется необходимым, перед тем, как начать эту вторую часть, сделать еще для каждого намеченного поля список обработок и удобрений. Эта работа делается в настоящее время в северном районе при сотрудничестве П. Г. Адмонт и Аррасской Агрономической Станции.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) Barbier (G.) . — Le problème de l'humus. Conférence C. E. T. A. de Ham, 1954.
(2) Hebert (J.). — Étude des sols de l'Aisne. C. R. travaux 1953. *Ann. Agr.*, p. 689, 1954.
(3) Hebert (J.). — Le problème de l'humus dans les régions de culture industrielle du Nord de la France. *C. R. Ac. Agr.*, **43**, nº 8, p. 427, 1957.
(4) Joret (G.). — Recherches sur les sols de limon de la Picardie et leur état actuel de fertilité. *Ann. Agr.*, p. 30 et 170, 1942.
(5) Joret (G.). — Étude comparée de sols en culture intensive. *Ann. Agr.*, XX, p. 717, 1950.
(6) Joret (G.) et Malterre (H.). — Les sols dérivés des argiles à silex et des biefs de Picardie. *Ann. Agr.*, p. 16 et 507, 1935.

(7) JORET (G.) et MALTERRE (H.). — Les sols crayeux de Picardie. *Ann. Agr.*, p. 61, 1937.
(8) JORET (H.) et MALTERRE (H.). — Les sols du Vimeu. *Ann. Agr.*, p. 367, 1943.
(9) JORET (G.) et MALTERRE (H.). — Les sols du plateau picard. *Ann. Agr.*, p. 178, 1945.
(10) JORET (G.) et MALTERRE (H.). — Les sols du Santerre et du Vermandois. *Ann. Agr.*, p. 165, 1947.
(11) JORET (G.), MALTERRE (H.), LEFÈVRE (P.) et HIROUX (G.). — Les sols du Ponthieu. *Ann. Agro.*, p. 471, 1953.
(12) JOUIS (E.). — Utilisation des cartes encochées pour la classification des sols analysés. Bull. A. F. E. S., nº 49, 1953.
(13) LEFÈVRE (G.). — Utilisation de la mécanographie pour les analyses de sols. Communication interne à l'I. N. R. A.
(14) LEFÈVRE (P.). — Influence du milieu et des conditions d'exploitation sur le développement des plantes adventices. Effet particulier du pH et de l'état calcique. *Ann. Agr.*, p. 299, 1956.
(15) LEFÈVRE (P.). — Les affleurements des formations géo-pédologiques picardes. Bull A. F. E. S., nº 85, 1957.
(16) WAGUET (P.). — Géologie agricole du département de l'Oise. Beauvais. Deuxième édition.

L'INOCULATION DE LA LUZERNE

1re PARTIE. — SÉLECTION DE SOUCHES BACTÉRIENNES

PAR

M. OBATON, H. BLACHÈRE et P. FERRY

Avec la collaboration technique de Melles H. HAMY et J. BOUREAU
Station centrale d'Agronomie, Versailles.

PLAN DU MÉMOIRE

I. — L'inoculation des Légumineuses.
Introduction.
L'inoculation des Légumineuses dans le monde.
L'inoculation des Légumineuses en France.

II. — Partie expérimentale.
Isolement des souches.
Test de la valeur fixatrice des souches.

III. — Conclusion.

Bibliographie.

I. — L'INOCULATION DES LÉGUMINEUSES

Introduction.

Il est bien connu que la nutrition azotée des Légumineuses s'effectue principalement aux dépens de l'azote atmosphérique, grâce à la symbiose Légumineuses-Rhizobium ; on a cependant souvent tendance à sous-estimer l'importance des bactéries.

La symbiose est d'efficacité très variable suivant les souches de Rhizobium présentes dans le sol, l'activité fixatrice peut même être presque nulle. D'autre part, les souches de Rhizobium correspondant à une Légumineuse ne sont pas nécessairement présentes dans le sol ; ce sera le cas si la Légumineuse est cultivée pour la première fois sur ce sol, ou si celui-ci est peu favorable à la conservation des bactéries.

L'inoculation des semences permet d'apporter à la Légumineuse une souche de Rhizobium dont le pouvoir fixateur intense a été contrôlé.

A. DEMOLON caractérise ainsi l'amélioration apportée par cette technique dans la culture de la Luzerne :

« L'inoculation se traduit par une bonne implantation, une vigueur végétative accrue, des rendements plus élevés (5 coupes) et une durée plus prolongée sans signe de dégénérescence » (1).

Il a d'autre part montré qu'une symbiose défectueuse diminue la teneur en azote du fourrage (2) et supprime l'arrière-effet dû à l'enrichissement du sol en azote par la culture des Légumineuses (3).

L'inoculation des Légumineuses dans le monde.

Les premières expériences remontent à 60 ans environ: des cultures de Trèfle sont améliorées par apport de terre provenant de trèflières florissantes ; puis furent effectuées des inoculations au moyen de cultures de Rhizobium : leur succès fut variable (rapporté par P. MANIL et Ch. BONNIER (4)).

Mais cette technique ne prit beaucoup d'extension qu'après 1925 à la suite des travaux de H. G. THORNTON concernant le Trèfle et la Luzerne en Angleterre.

Il est très difficile de connaître l'importance économique exacte de l'inoculation, signalons simplement que les graines de plusieurs espèces de Légumineuses sont inoculées de manière courante en Amérique, Australie et Russie ; en Afrique, les premiers essais concernant le Soja et l'Arachide ont donné des résultats concluants (5) ; en Europe, l'inoculation est surtout effectuée sur les graines de Luzerne et de Trèfle.

En ce qui concerne la Luzerne, les premiers essais de H. G. THORNTON (6) dans diverses régions d'Angleterre donnèrent des augmentations de rendement allant de 5 p. 100 à 236 p. 100 (résultats de 9 champs d'expérience). Actuellement, l'inoculation de la Luzerne est généralisée (7). En Belgique, les premiers essais furent effectués par P. MANIL et Ch. BONNIER en 1948. Leurs travaux ont notamment permis l'introduction de la Luzerne dans des sols acides des Ardennes belges (après chaulage). Actuellement, toutes les luzernières sont inoculées ; « une évaluation prudente a permis de fixer à 20 p. 100, au moins, le supplément de récolte résultant directement de l'inoculation » (8).

L'inoculation est aussi pratiquée avec succès aux Pays-Bas : le rendement en fourrage vert par coupe est passé de 5 300 kg/ha à 6 600 et 8 600 kg/ha grâce à l'inoculation. En Suède, 99 p. 100 des champs d'essai ont donné des résultats positifs : augmentation de rendement de 15 p. 100 à 900 p. 100 (9). Des travaux concernant cette question sont actuellement entrepris en Espagne (10).

L'inoculation des Légumineuses en France.

A. — Travaux de A. Demolon et résultats.

A. DEMOLON fit une étude approfondie des différents aspects de la symbiose fixatrice, de 1933 jusqu'à sa mort en 1954. La conséquence pratique de ses travaux fut l'introduction et le développement de l'inoculation en France.

En 1951, auraient été inoculés 10 000 ha de cultures de Légumineuses : Luzerne, Trèfle, Soja, Pois, Haricot. Cette technique a permis « la création de Luzernières dans des régions où cette opération était tenue pour impossible (Jura-Indre) ; elle a permis de ramener cette culture dans diverses régions où elle avait dû être abandonnée à la suite d'échecs répétés (Calvados, Gard, Charente) ; ailleurs, elle a augmenté les rendements et retardé l'apparition de la fatigue. Sauf dans les sols riches en azote, elle s'est montrée presque toujours avantageuse pour toutes les légumineuses cultivées » (11).

B. — Régression de la pratique de l'inoculation.

Actuellement, les souches isolées par DEMOLON ne sont plus commercialisées. L'inoculation ne concerne en France que 2 000 à 3 000 ha au moyen d'inoculum d'origine étrangère.

Tandis que chez nos voisins étrangers, l'inoculation se développait au point de devenir une pratique de culture normale, dans le même temps elle était presque abandonnée chez nous.

Après la mort de A. DEMOLON, le manque de contrôle dans la production des cultures de Rhizobium, l'absence d'essais systématiques, sont les causes de cet échec : les agriculteurs ont obtenu des résultats irréguliers et ont abandonné l'inoculation.

C. — Les travaux actuels.

Le Laboratoire de Microbiologie de la Station Centrale d'Agronomie a repris cette année l'étude systématique de la symbiose Légumineuse-Rhizobium, en se limitant pour commencer à l'aspect agronomique de la question.

Notre étude porte actuellement sur la Luzerne ; ce choix est motivé par plusieurs arguments :

— la luzerne est la légumineuse la plus cultivée en France et les surfaces qui lui sont consacrées augmentent sans cesse (environ 1 600 000 ha) ;

— les échecs de la Luzerne sont cependant fréquents et inexpliqués ;

— de nombreux agriculteurs souhaiteraient pouvoir remplacer le Trèfle par la Luzerne, notamment en raison de la bonne résistance à la sécheresse de cette dernière.

— c'est pour la Luzerne que l'inoculation a donné les meilleurs résultats.

Il est donc urgent de définir les conditions d'utilisation de l'inoculation de la Luzerne. Nos travaux ont porté cette année sur 2 points : isolement et test de souches de Rhizobium, organisation d'essais d'inoculation dans diverses régions.

II. — PARTIE EXPÉRIMENTALE

Isolement des souches.

A partir de prélèvements de nodules effectués sur des Luzernières de vigueur végétative très différente, nous avons isolé 7 souches de Rhizobium. Leur composition variable en polysaccharides donne aux colonies un aspect différent :

— colonies très fluides, transparentes,
— colonies visqueuses, crémeuses,
— colonies plissées, blanches.

Technique d'isolement et de purification des souches.

Les nodules sont stérilisés dans une solution de chlorure mercurique à 1 p. 1 000 pendant 2 mn (12) puis écrasés en boîte de Pétri stérile avec une baguette de verre stérile. On prélève ensuite stérilement avec une anse de platine et on ensemence en strie sur boîte de Pétri contenant un milieu gélosé à la mannite et eau de levure (12). Le milieu synthétique mis au point au Laboratoire (13) n'a pas été utilisé dans ces travaux préliminaires.

Par repiquages successifs de très jeunes colonies (2 à 3 jours), on obtient une souche pure.

Test de la valeur fixatrice des souches.

Ce test a été effectué en trois étapes :

A. — Inoculation de Luzernes cultivées stérilement sur milieu gélosé.

La stérilisation des graines de Luzerne (population « Flamande ») est effectuée par l'alcool à 95°, 15 mn, puis au chlorure mercurique à 2 p. 1 000, 3 mn, suivi de 8 lavages successifs à l'eau stérile.

Ces différentes opérations sont effectuées dans une même boîte de Pétri, les solutions et l'eau stérile sont apportées et enlevées au moyen d'une pipette Pasteur à boule (15).

Les graines sont ensuite mises à germer à l'étuve à 25° en boîte de Pétri, sur le milieu ayant servi pour l'isolement des Rhizobium (12). Cette méthode permet de mettre en évidence les graines dures ou contaminées, elles sont éliminées (16).

Les graines germées (radicelles de 1 cm) sont transplantées en tubes gélosés inclinés, stériles (14).

L'inoculation est faite le lendemain avec 2 gouttes d'une culture riche de Rhizobium, en faisant tomber ces gouttes sur la radicelle.

20 tubes sont inoculés par souche.

Les tubes sont placés dans des portoirs spéciaux assurant une obscurité relative autour de la racine.

Les portoirs sont disposés en serre :

en été, ils sont protégés du soleil,

en hiver, éclairage d'appoint uniforme par tubes fluorescents (2 000 lux au niveau des feuilles pendant 16 h par jour), température 25°C.

La valeur des souches est appréciée d'après le nombre, la taille, la couleur des nodules, le développement et la couleur des feuilles de Luzerne.

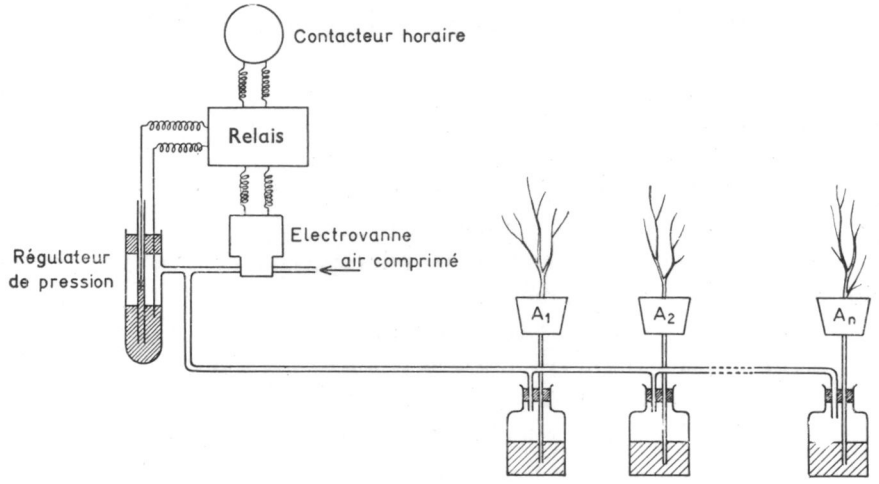
Cette technique a permis de vérifier que les souches microbiennes isolées sont bien des Rhizobium, et d'obtenir une première indication sur la valeur fixatrice de ces souches.

La variabilité génétique des populations de luzerne est grande, si bien que l'on ne peut ainsi obtenir de résultats suffisants. Nous avons donc été amenés à compléter ces essais par des essais en serre sur vases de végétation.

B. — Inoculation de luzerne cultivée stérilement sur sable en solution nutritive minérale.

Il est ainsi possible de faire porter l'essai sur une cinquantaine de graines pour chaque souche. Le dispositif utilisé ne comporte pas de lessivage continuel qui peut compromettre l'inoculation. Chaque vase de végétation est connecté à un récipient contenant la solution de sels minéraux sans azote et inoculée avec la souche bactérienne étudiée. Un système comprenant une vanne à air comprimé commandée par un contacteur horaire envoie par un relais 4 fois par jour par le bas cette solution dans les vases de végétation (A). Un régulateur de pression règle le niveau du liquide à une valeur constante. La solution nutritive est renouvelée toutes les semaines. On obtient ainsi une irrigation uniforme de toutes

les plantes dans le pot, une bonne aération des racines sans lessivage des bactéries. Un seul dispositif régulateur peut servir à alimenter un nombre indéterminé d'essais. Le niveau de montée du liquide étant réglé à 2 cm au-dessous du niveau du sable, il n'y a pas de développement d'algues.



L'ensemble du dispositif est monté sur wagonnets. Chaque essai est fait en triple exemplaire.

L'activité fixatrice des souches est mesurée par pesée de la récolte.

Souche	Poids sec récolté en 3 coupes (en grammes)
Sa 10	22
S 22 (Belge)	15
Sa 1	19
Sa 4	14
V3	10
V4	12
V8	7
Témoin non inoculé	3

Les souches Sa 1 et Sa 4 ont une activité comparable à celle de la souche Belge S 22 isolée par M. MANIL et BONNIER à Gembloux. La souche Sa 10 a une activité fixatrice supérieure.

C. — Essais en pleine terre.

Les points à l'étude sont les suivants par ordre d'importance :

1° Déterminer les régions où la culture de la luzerne peut être rendue possible grâce à l'inoculation.

2° Déterminer dans quelle mesure le rendement peut être augmenté dans les régions de culture traditionnelle (une augmentation de 3 p. 100 est déjà rentable en raison du faible prix de l'inoculum).

3° Détermination de l'effet de l'inoculation sur la teneur en azote du fourrage.

4° Détermination du pouvoir compétitif des souches isolées à Versailles par rapport aux souches autochtones.

Nos possibilités de production de bactéries sont actuellement le facteur limitant. En ce qui concerne le point 1, un essai portant sur 1,5 ha a été effectué en Bretagne dans un sol argilo-sableux sur schiste fissuré pH 6 réputé impropre à la culture de la luzerne. Sur la parcelle témoin, les plantes clairsemées ont présenté tous les symptômes de faim d'azote, la parcelle inoculée était au contraire très dense et vert foncé. Trois coupes ont été faites, 15 t à l'hectare ont été récoltées sur le témoin contre 40 t à l'hectare sur l'inoculée. Aucun chaulage n'avait été fait.

De tels essais seront multipliés dans les années à venir; ils semblent démontrer que l'introduction de la luzerne est très réalisable en Bretagne et probablement dans le Massif Central.

III. — CONCLUSIONS

De très nombreux essais restent encore à faire pour la sélection des souches et le perfectionnement des techniques d'inoculation. En particulier : étude du pouvoir inoculant en fonction du pH, de la faculté de conservation dans le sol, détermination de critères biochimiques pour la sélection. Les techniques de préparation et de conservation des inoculum pourraient également être considérablement perfectionnées en particulier par l'étude des conditions de lyophilisation adaptée à ces germes. Il est cependant très vraisemblable que dans son état actuel, cette méthode puisse permettre l'introduction de la luzerne dans des régions nouvelles et l'amélioration de la valeur fourragère (teneur en azote) dans de nombreuses autres. Des efforts conjugués de vulgarisation et de mise au point technique doivent permettre d'atteindre ce but.

RÉSUMÉ

L'inoculation des légumineuses par les bactéries symbiotiques a pris encore peu d'extension en France. Le laboratoire de Microbiologie des Sols a entrepris la sélection de souches bactériennes à haut pouvoir fixateur. Les méthodes de sélection des souches bactériennes employées et les premiers résultats obtenus sont indiqués.

SUMMARY

The inoculation of lucerne

Since the inoculation of legumes with symbiotic bacteria is yet little employed in France, the Microbiological laboratory undertook a selection of

bacterial strains possessing high fixing capacities. The methods of selection of the bacterial strains utilized and preliminary results are discussed.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Luzerneimpfung

Die Impfung der Schmetterlingsblütler mit symbiotischen Bakterien hat sich bis jetzt kaum in Frankreich verbreitet. Das Laboratorium für Boden-mikrobiologie hat die Selektion Bakterienstämme mit hoher Stickstoffbindefähigkeit unternommen. Die benützten Selektionsverfahren sowie die ersten Ergebnisse werden angegeben.

Инокуляция люцерны.

ОБАТОН, БЛЯШЭР и ФЕРРИ. Микробиологическая лаборатория. Версаль.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Инокуляция мотыльковых симбиотическими бактериями еще мало развита во Франции. Микробиологическая почвенная лаборатория предприняла селекцию разновидностей микробов, имеющих высокую азотофиксирующую способность. Примененные методы селекции микробных разновидностей и первые достигнутые результаты указаны.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) DEMOLON (A.). — *C. R. Soc. des Sc. nat. du Maroc*, 6 bis, 98-106, 1950.
(2) DEMOLON (A.) et DUNEZ (A.). — *C. R. Acad. Sc.*, **221**, 586-588, 1945.
(3) DEMOLON (A.) et DUNEZ (A.). — *C. R. Acad. Sc.*, **221**, 309-311. 1945.
(4) MANIL (P.) et BONNIER (CH.). — *Bull. Inst. Agr. et Stat. Rech. Gembloux*, XVII, 123-142, 1948-1949.
(5) BONNIER (CH.). — Publication de l'INEAC, **72**, 67 p., 1957.
(6) THORNTON (H.). — *J. of Agr. Sc.*, XIX, part. I, 48-70, 1929.
(7) NUTMAN (P. S.). — Communication orale, 1958.
(8) Prospectus destiné aux agriculteurs, intitulé « Augmentez le rendement de vos luzernières, inoculez vos semences .» Ministère de l'Agriculture de Belgique, 1952.
(9) POCHON (J.) et DE BARJAC (M.). — Traité de microbiologie des sols. Dunod, éd. Paris, p. 481-482, 1958.
(10) CABEZAS DE MERRERA. — *An. de Edaf y Fisiol-Veg.*, **15**, 85-116, 167-184, 1956.
(11) DEMOLON (A.). — *Revue gen. Bot.*, **58**, 42-64, 1952.
(12) POCHON (J.) et col. — Manuel de technique d'analyse microbiologique du sol. Masson et Cie, éd. Paris, p. 38, 1954.
(13) FERRY (P.), BLACHÈRE (H.) et OBATON (M.). — *Ann. Agro.*, 1959, sous presse.
(14) POCHON (J.) et coll. — Ouv. cit., p. 42.
(15) BONNIER (CH.). — *Bull. Inst. Agr. et Stat. Rech. Gembloux*, XXII, 167, 1954.
(16) BONNIER (CH.). — Communication orale.
(17) DEMOLON (A.) et DUNEZ (A.). — *Ann. Agro.*, X, 366-382, 1940.

ANALYSES DES SILICATES D'ALUMINE
(Minéraux argileux)
POSSIBILITÉS D'UTILISATION DES COMPLEXONES

PAR

R. GUENNELON [1]

Station d'Agronomie, Centre de Recherches agronomiques du Sud-Est, Montfavet (Vaucluse).

PLAN DU MÉMOIRE

I. — Composés naturels étudiés.
- A) Composition des minéraux argileux.
- B) Mise en solution.

II. — Dosage des principaux éléments.
- A) Détermination de Fe total.
- B) Détermination de Al total.
  - 1° Principe.
  - 2° Dosage de Fe seul.
  - 3° Dosage de Al seul.
  - 4° Dosage du fer en présence de Al.
  - 5° Dosage de la somme Fe + Al.

III. — Dosage de Ca et Mg.
  - 1° Dosage de Mg.
  - 2° Dosage de Ca.
  - 3° Dosage de Ca + Mg.
  - 4° Dosage de Ca en présence de Mg.
  - 5° Dosage de Ca en présence de beaucoup de Mg.

IV. — Marche de l'analyse.
- A) Détermination de H_2O^- et H_2O^+.
- B) Fusion et dosage de SiO_2.
- C) Détermination de la somme Fe + Al.
- D) Détermination de Fe total.
- E) Détermination de Fe^{++}.
- F) Détermination du groupe.
- G) Dosages de Ca et Mg.
- H) Détermination de Ti.

V. — Dosage des alcalins.
- A) Attaque et séparation.
- B) Dosages.

Conclusion.

Bibliographie.

[1] Avec la collaboration technique de M. R. BLANC.

Dans le but d'étudier les minéraux argileux, on a passé en revue les possibilités d'emploi de la complexométrie, pour l'analyse de ces composés ; la présence, en quantités variables, de fer, d'aluminium, de calcium et de magnésium réclamait une mise au point des conditions opératoires. On verra plus loin que l'on a dû, pour l'un de ces éléments, abandonner l'utilisation de ces méthodes par suite d'interférences. Néanmoins, l'utilisation de ces méthodes permet de gagner du temps dans les dosages en série, sans que cela soit au préjudice de la précision, *lorsqu'on se place dans des conditions déterminées, pour le dosage.*

I. — COMPOSÉS NATURELS ÉTUDIÉS

On a surtout pensé à donner des indications pour un dosage rapide de minéraux contenant SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, CaO, Na_2O, K_2O, à l'exclusion des composés borosilicatés, des silicates nickelifères ou zincifères, des silicotitanates, etc. C'est dire qu'on limite volontairement cette mise au point, aux minéraux argileux typiques ou que l'on peut extraire d'un sol (ou d'une roche) après traitement mécanique.

A. — Composition des minéraux argileux.

Les minéraux argileux sont répartis dans un certain nombre de groupes, correspondant à des édifices cristallins différents. La composition chimique varie également dans d'assez larges limites. On peut, par exemple être amenés à doser Fe en présence de 50 fois son poids d'aluminium. Le tableau I donne une idée de la composition des éléments à doser. On a groupé les données analytiques par familles minéralogiques, ce qui fait que l'on trouve dans la même colonne des composés aussi différents que l'illite et la glauconie pour lesquels, par exemple, la teneur en Fe_2O_3 passe de 4 à 18,8 p. 100. Il en est de même pour la bavalite, chlorite ferrifère (43 p. 100 de FeO) et la leuchtenbergite, chlorite magnésienne (37,6 p. 100 de MgO (1).

Il faudra donc utiliser un protocole d'analyses permettant de doser Fe et Al, quelles que soient leurs proportions respectives et de doser Ca et Mg, même en présence de grosses quantités de fer et d'aluminium et quel que soit le rapport Ca/Mg.

Enfin, il faudra dans certains cas tenir compte de la présence de Cr et de Ni pouvant perturber les dosages complexométriques.

B. — MISE EN SOLUTION

Pour des raisons de commodités, on a préféré à la fusion alcaline aux carbonates, la fusion par NaOH fondue. L'attaque est plus rapide, plus énergique et nécessite seulement des creusets de nickel.

On chauffe d'abord légèrement la soude en pastilles pour chasser l'eau ; puis on ajoute la poudre après refroidissement et on chauffe 20 minutes vers 400° dans un petit four à creuset électrique ; dans ce cas, il n'y a pas d'attaque du nickel et les silicates, l'alumine et TiO_2 sont bien décomposés. On reprend par l'eau chaude et on effectue la dissolution par HCl. On fritte ensuite la silice en milieu HCl concentré, puis à sec à 110° pendant une nuit. On filtre en lavant par HCl 1/100.

La silice est calcinée et déterminée par pesée avec moins de 0,5 p. 100 d'erreur. On peut pour une détermination plus précise, séparer la silice soluble en desséchant à nouveau le filtrat et en effectuant un second frittage suivi d'une seconde filtration.

La solution des métaux est amenée à 200 cc pour 2 grammes de produit attaqué.

TABLEAU I

Compositions centésimales des minéraux argileux
(d'après divers auteurs).

	Kaolin	Montmorillonite	Illite	Chlorite	Vermiculite	Sepiolite Attapulgite
SiO_2	40 à 55	40 à 58	38 à 53	20 à 32	34 à 36,5	46 à 55
Al_2O_3	30 à 40	0,1 à 20	8 à 32	14 à 25	10 à 17	0,2 à 14
Fe_2O_3	0 à 2	0 à 31	0 à 18,8	0,8 à 9	2 à 11	0,4 à 4
FeO	0 à 0,1	0 à 1	0 à 4	0 à 43	0,6 à 1	0,3 à 1,5
CaO	0,11 à 1	0 à 3,2	0 à 1,2	0 à 3,3	0 à 0,5	0 à 9
MgO	0 à 0,5	0 à 26	1 à 7	2,3 à 37,6	19 à 25	5 à 25
Na_2O	0 à 0,4	0 à 3	0 à 1	traces	traces	0 à 0,4
K_2O	0 à 1,5	0 à 0,6	3 à 8	traces	traces	0 à 0,5
TiO_2	0 à 2,1	0 à 0,8	0 à 5	traces	0,2	
H_2O^-	0 à 6	8,5 à 24	6 à 12	7,6 à 13,6	18 à 21	17 à 24
H_2O^+	11,8 à 17					
Cr_2O_3	—	—	—	0 à 1,6	—	—
NiO	—	—	—	—	0 à 2,3	

II. — DOSAGES DES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS

A. — Détermination de Fe total.

Le dosage par le Complexon III, présente l'intérêt d'une exécution facile, et, selon SCHWARZENBACH, d'une bonne précision. La méthode s'applique pour des concentrations en Fe allant de 0,01 à 0,001 m, même en milieu chlorhydrique, à condition de bien oxyder le fer au préalable, par un cristal de $S_2O_8K_2$.

Si la précision et la reproductibilité du dosage est bonne en l'absence de cations autres que Fe, il n'en est plus de même lorsque des quantités

importantes d'Al se trouvent dans la solution. A pH 2,5, en présence d'acide sulfosalycilique comme indicateur, le virage est mauvais et la coloration due à Fe^{3+} disparaît, puis réapparait lentement, même après dépassement de la quantité théorique de Complexon.

On trouvera dans le tableau II, les résultats du dosage du fer en présence d'aluminium, à 50°, à pH 2,5, avec l'acide sulfosalycilique.

On voit que le dosage de 5,5 mg de fer par cette méthode n'est possible qu'avec moins de 0,54 mg d'Al, si l'on cherche une précision supérieur à 0,5 p. 100. Cette technique n'est donc pas applicable au dosage du fer dans les argiles.

TABLEAU II

Dosage de Fe en présence d'Al.

Solution de fer 0,099 m	Solution d'Al 0,1 m	E. D. T. A. 0,1 m	Fe dosé en mg.	Erreur en %
	0	0,990	5,529	0
	0,1	0,993	5,546	+ 0,3
	0,2	0,994	5,551	+ 0,4
	0,3	1,012	5,652	+ 2,2
	0,4	1,018	5,685	+ 2,8
	0,5	1,013 — 1,013	5,658	+ 2,4
1 cc soit 5,529 mg. de Fe^{+++}	1	1,02 — 1,005	5,669 moyenne	+ 2,5
	1,5	1,035 — 1,038	5,789 —	+ 4,7
	2	1,040 — 1,021	5,755 —	+ 4,1
	3	1,032 — 1,00	5,674 —	+ 2,6
	6	1,133 — 1,089	6,205 —	+ 12,2
	9	1,284 — 1,099	6,654 —	+ 20,3
	12	1,207 — 1,180	6,666 —	+ 20,5
	15	1,150 — 1,094	6,266 —	+ 13,3

En présence d'un excès d'Al, en milieu faiblement acide, et à température inférieure à 50°, il se forme un complexe avec Al, peu stable à ce pH, mais qui influe sur la précision du dosage.

On a pu le montrer en opérant différemment. Une solution d'Al est additionnée de complexone et amenée à pH 2,5-2,7. L'excès de Complexone est titrée à 50° par une solution de fer en présence d'acide sulfosalycilique. On obtient les résultats suivants :

a) Pas d'aluminium. 3 cc d'E. D. T. A.(env. 0,1 m).

Le titrage se fait rapidement jusqu'à 2,6 cc de solution de fer 0,1 m. A partir de 2,8 cc, la coloration du complexe Fer-Acide sulfosalycilique disparaît lentement. On titre à coloration constante à 2,94 cc.

b) 1 cc d'Al 0,1 m. 3 cc d'E. D. T. A.

La coloration due à la goutte de la solution de fer disparaît lentement dès 2,3 cc de solution titrante. A 2,7, la réaction est très lente et l'on termine vers 2,92-2,93 cc.

c) 2 cc d'Al 0,1. 3 cc d'E.D. T. A.

La coloration apparaissant à la goutte s'atténue lentement dès 1,5 cc ;

si l'on maintient à 50°, on peut aller jusqu'à 2,6 cc. Puis la réaction devient très lente et on termine à 2,91 cc.

d) 2,5 cc d'Al 0,1 m. 3 cc d'E. D. T. A.

Le dosage est rapide jusqu'à 1,15 cc, et devient extrêmement lent vers 2,6 cc.

e) 2,75 ce d'Al 0,1 m. 3 cc d'E. D. T. A.

La coloration due à la goutte se maintient pendant 25 secondes dès que l'on a versé 0,30 cc de fer 0,1 m.

f) 3 cc d'Al 0,1 m — 3 cc d'E. D. T. A.

A partir des premières gouttes de fer (0,15 cc), la coloration due au fer disparaît très lentement.

On peut en conclure que à 50°, l'aluminium donne un complexe qui, à pH 2,5 ne se dissocie que lentement. La formation du complexe avec Fe^{+++} étant elle-même de vitesse limitée, on conçoit que le titrage d'une solution contenant Fe et Al, directement par la Complexone III présentera certaines difficultés.

En effet, au point d'équivalence théorique, une faible quantité de complexon peut avoir servi à complexer Al. Comme ce complexe va se dissocier lentement, on sera amené à verser un excès de réactif pour faire disparaître la coloration due au complexe Fe^{+++}/acide sulfosalycilique.

On n'a pas obtenu de résultats satisfaisants en essayant de complexer Al par F Na, car si le complexe Fe^{+++}/F^- est moins stable que le complexe, Fe^{+++}/E. D. T. A., (tout au moins pour de faibles quantités de F Na), le fluorure de sodium détruit le complexe Fe^{+++}/acide sulfosalycilique, rendant l'indicateur inutilisable.

On a également essayé d'améliorer ce dosage en augmentant la force ionique de la solution (en ajoutant une quantité importante de SO_4K_2) et en utilisant l'ion NH_4^+ au lieu de Na^+.

Le tableau III donne les résultats obtenus à pH 2,6-2,7, pour 100 cc de solution, avec 5 g de SO_4K_2, pour 1 cc de solution ferrique 0,1 m, à 50°.

TABLEAU III

Dosage du fer en présence d'Al et de SO_4K_2

Fe ⇄ 0,1 m en cm³	Al — 0,1 m en cm³	SO_4K_2 en gr	E. D. T. A. en cm³	Observations
1	0	0	0,985	Virage net
1	0	0	0,980	—
1	0	4	0,980	—
1	0	4	0,985	—
1	3	0	1,180	à 48° virage peu net
1	3	0	1,340	à 60° virage très peu net
1	3	4	1,08	Virage peu net
1	3	4	1,11	—

Enfin, on a essayé de voir, si malgré tout, l'adjonction de SO_4K_2 pouvait rendre le dosage possible, pour de petites quantités d'Al. Pour cela, on a titré 1 cc de fer 0,1 m en présence de quantités croissantes d'Al. 0,1 m, à pH 2,6-2,7, en milieu tampon acide monochloracétique-acétate d'ammonium, à 50° en présence de 2 g de SO_4K_2 dans 100 cc.

Le dosage était réalisé lentement à raison d'1/100 de cm³ de solution d'E. D. T. A. environ 0,1 m toutes les 3 secondes.

On obtient les résultats représentés sur la figure 1 ; on voit, que pour un rapport moléculaire Al/Fe de 0,25 l'erreur peut déjà atteindre plus de 2 p. 100 et que les erreurs ne sont pas strictement proportionnelles à la teneur en Al, ce qui ne permet pas de calculer un terme correctif.

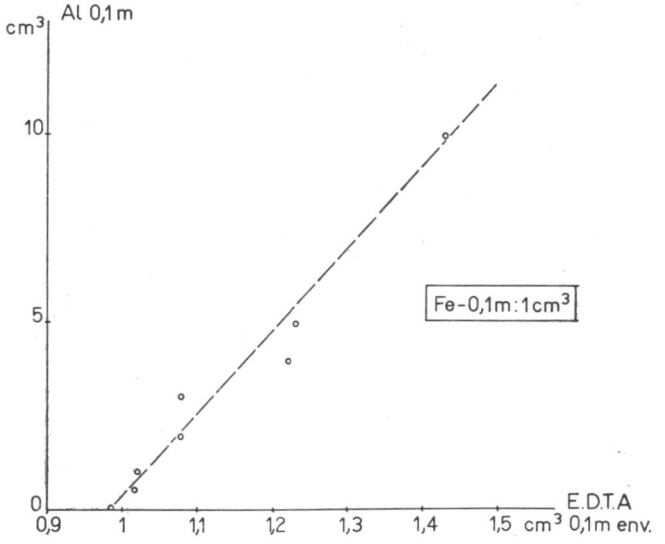


FIG. 1. — Dosage de Fe en présence de SO_4K_2.

L'adjonction de SO_4K_2, parfois préconisée n'a donc pas donné satisfaction, d'ailleurs, on doit tenir compte, dans les analyses prévues, de la présence de l'ion Ca^{++}, qui précipitant avec SO_4^{--}, risque de gêner le dosage.

Le dosage du fer par complexométrie en présence d'Al, se heurte donc à la difficulté suivante : aux pH inférieurs à 3 et à 40°-50°, une faible quantité d'Al est complexée, d'une manière instable, mais suffisamment toutefois pour que le titrage en direct soit délicat, sinon impossible.

On préfère donc employer une technique basée sur les propriétés du système Redox Fe^{+++}/Fe^{++} (2) ; on réduit Fe^{+++} par le chlorure stanneux ; l'excès de Sn^{++} qui doit être faible est oxydé par le chlorure mercurique et l'on titre par $Cr_2O_7K_2$ en présence de diphénylamine — sulfonate de baryum en milieu sulfurique et phosphorique.

La méthode s'applique même en présence de Cl^-, de Ti^{4+} et, avec des solutions 0,1 m à la microburette, on obtient une précision de moins de 0,5 p. 100 pour 5 mg de fer en solution 0,01 m.

La comparaison avec la méthode à l'acide sulfosalycilique et le complexone III sur 8 échantillons d'illite et d'attapulgite, a donné les résultats du tableau IV.

TABLEAU IV

Comparaison du dosage de Fe par complexométrie et par oxydoréduction au bichromate.

en mg	1 Fe_2O_3	2 Fe_2O_3	3 Al_2O_3	4 Al_2O_3	5	6
1	99,6	84,5	183	192,2	15,1	+ 17,8
2	85,6	81,7	164	166,3	3,9	+ 4,8
3	60,6	56,6	140,2	142,6	4	+ 7
4	56	51,9	143,1	145,6	4,1	+ 7,9
5	59,9	55,7	120,8	123,2	4,2	+ 7,5
6	60,6	56,9	136,2	138,5	3,7	+ 6,5
7	61,4	58,8	131,8	133,1	2,6	+ 4,4
8	42	38,4	128,2	130,1	3,6	+ 9.4

1 : Fe_2O_3 en mgrs dans l'échantillon (Fe dosé par compléxométrie)
2 : — (Fe dosé par le bichromate)
3 : Al_2O_3 — (Somme Fe + Al, moins Fe dosé par compléxométrie)
4 : — (Somme Fe + Al, moins Fe dosé par bichromate)
5 : Ecarts sur les 2 déterminations de Fe_2O_3
6 : Erreurs sur Fe_2O_3 en %. (en opérant par complexométrie)

L'erreur augmente avec la teneur en Al_2O_3 et avec le rapport Al/Fe ; mais on sait d'après les résultats du tableau II, que les erreurs dues à la présence d'Al sont variables avec les petites différences inévitables dans le mode opératoire d'un dosage rapide.

B. — Détermination de Al total.

Les méthodes classiques de détermination de l'aluminium utilisent soit la gravimétrie, par pesée de Al_2O_3, avec ou sans séparation de Fe, par pesée de PO_4Al (Fe, Ti précipitent également), par pesée (ou volumétrie) de l'oxinate d'Al (Fe, Ti gênent), soit par colorimétrie de l'aluminon (Fe^{3+} gêne).

Par complexométrie, on peut doser Al seul, après séparation de Fe en milieu sodique à chaud, soit doser la somme Fe + Al. Nous nous arrêterons à cette solution.

On a préconisé de doser d'abord Fe en titrage complexométrique direct en présence de Chromazurol S, à pH compris entre 2 et 3, (7), de remonter le pH à 5, puis continuer le titrage pour Al, à chaud (8). Ce que l'on a vu au paragraphe A, au sujet du comportement de Al vis-à-vis de la Complexone III, à pH 2-3, n'incite pas à utiliser cette technique

pour doser Fe. Par contre, on pourrait, directement à pH 5, doser la somme Fe + Al, mais le réactif est d'un maniement délicat et, de plus, la vitesse faible de formation du complexe-Al ne permet pas d'attendre du titrage en direct des résultats très précis.

Par contre, le titrage en retour, est bien préférable, puisque l'on place Al en présence d'un excès de réactif et que l'on peut agir ainsi sur la vitesse de formation du complexe.

1° **Principe** (3).

On titre l'excès de complexon III par du zinc titré avec un indicateur de fin de réaction. Pour cela, on utilise un système ferri-ferrocyanure de potassium et un indicateur d'oxydo-réduction convenable. On a choisi la diméthyl 3-3' naphtidine : $(CH_3\text{-}C_{10}H_5\ (NH_2))_2$. A pH $>$ 4, le système Redox ferri-ferrocyanure oxyde cet indicateur qui vire au rose, dès que le potentiel apparent du système augmente. Il suffit pour cela, d'une trace de zinc en excès qui précipite le ferrocyanure de zinc et de potassium. Le rapport ferri/ferro devient alors très grand et le système, très oxydant.

On a :

(1) Complexon III + Zn^{++} → Complexon-Zn + Zn^{++} en excès.

(2) $Fe(CN)_6^{4-} + 3\ Zn^{++} + 2\ K^+ \rightarrow Fe\ (CN)_6K_2Zn_3 \downarrow$.

(3) $Fe(CN)_6^{3-} + e \rightleftarrows Fe(CN)_6^{4-}$.

(4) Diméthyl naphtidine réduite (incolore) — e → diméthyl naphtidine oxydée (rose).

2° **Dosage de Fe seul.**

On peut doser Fe seul par cette méthode (tableau V) sans précaution spéciale puisque le complexe avec le fer se forme rapidement, à condition d'ajouter le tampon après la complexone.

TABLEAU V

Dosage du fer.

Fe en cm³ de solution 0,1 m.....	0	0,5	1	1,5	2	2,5	2,75
Fe présent en mg.....	0	2,792	5,585	8,377	11,170	13,962	15,359
E. D. T. A. env. 0,1 en cm³.....	3	3	3	3	3	3	3
Fe dosé.....	0	2,79	5,64	8,45	11,08	13,81	15,38
Erreur %.....	0	0	+ 1	+ 0,9	— 0,8	— 1,1	+ 0,1

3° Dosage de Al seul.

Il suffit pour obtenir la formation du complexe de faire bouillir 2 à 3 minutes la solution légèrement acide en présence d'E. D. T. A., et d'ajouter la solution tampon en faisant refroidir ; le tableau VI montre que le dosage est valable dès que la concentration en Al dépasse 0,001 m pour une solution titrante 0,1 m et que l'excès de complexon III est suffisant.

On a donc quelquefois intérêt à recommencer un dosage si l'excès de réactif par rapport à l'aumlinium dosé est jugé trop faible.

TABLEAU VI

Dosage de l'aluminium.

Complexon environ 0,1 m	Al en cc 0,1 m dans 50 cc	Al dosé en cc 0.1 m	Erreur en %	Rapport moléculaire Complexon / Aluminium	Concentration en Al dans la solution
2 cc.....	0	0	0	∞	
2 cc.....	0,25	0,255	+ 2	8	0,0005 m
2 cc.....	0,50	0,515	+ 3	4	0,001 m
2 cc.....	0,75	0,758	+ 1	2,6	0,0015 m
2 cc.....	1	0,987	— 1,3	2	0,002 m
2 cc.....	1,25	1,24	— 0,8	1,6	0,0025 m
2 cc.....	1,50	1,495	— 0,3	1,3	0,003 m
2 cc.....	1,75	1,718	— 1,9	1,14	0,0035 m
2 cc.....	1,9	1,85	— 2,6	1,09	0,0038 m
2 cc.....	2	1,89	— 5,5	1	0,004 m

4° Dosage du fer en présence d'Al.

De petites quantités de F Na, ne perturbent pas le dosage du fer, mais ne peuvent être utilisées que pour des quantités très faibles de Al, ce qui n'est pas toujours le cas dans les dosages que l'on se propose.

On remarquera sur la figure 2, qu'il faut environ 4 cm³ de F Na 0,5 m pour masquer presque totalement 3 millimolécules de Al, une partie, toutefois, de Al reste libre tant que l'excès de F Na n'est pas plus important.

En présence de fer, le masquage de Al n'est pas complet, si l'on apporte uniquement la quantité de F Na correspondant à un complexe de formule AlF_3, 3 F Na, soit 3,6 cc de solution 0,5 m, mais si l'on dépasse cette quantité et pour de faibles teneurs en Fe, on ne retrouve plus la quantité de fer apportée.

Enfin, pour des quantités de Fe et d'Al variant en sens inverse, le masquage de Al est complet pour une quantité de F Na correspondant au

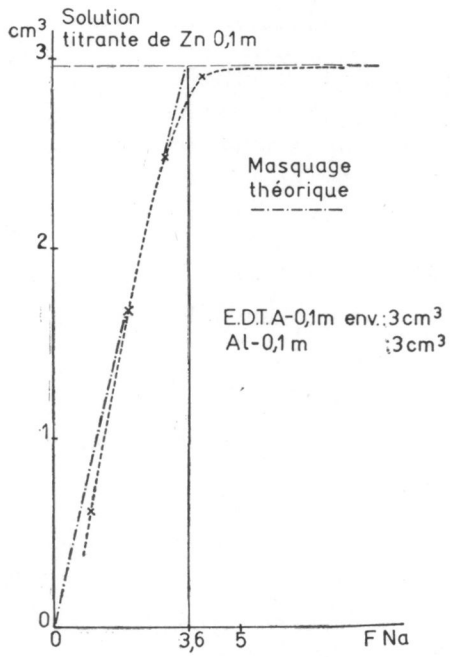


FIG. 2. — Masquage de 3 millimolécules d'Al par F Na.

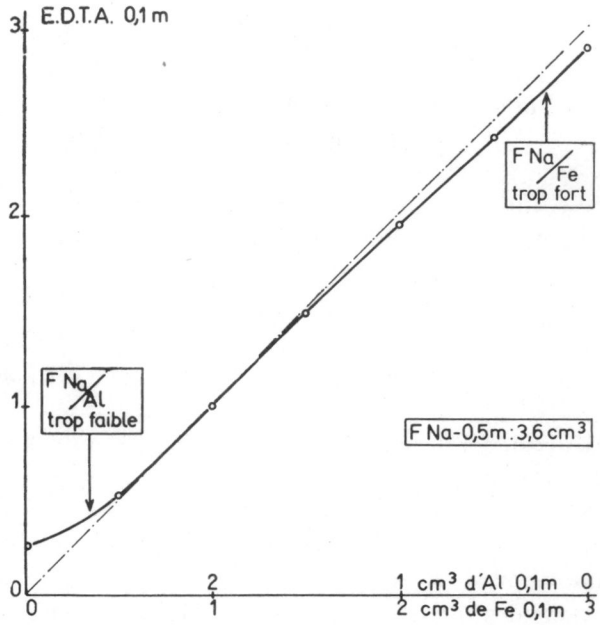


FIG. 3. — Masquage de Al et dosage du fer (3,6 cc de F Na 0,5 m).

double de la quantité théorique, et le dosage du fer est le moins perturbé quand le rapport Fe/Al = 1 (voir fig. 3).

Le domaine de l'utilisation de la technique est donc assez réduit.

5° Dosage de la somme Fe + Al.

Les divers essais ont montré que l'on obtenait les meilleurs résultats pour cette somme avec le *mode opératoire suivant* : une prise d'essai contenant de 0,05 à 0,25 millimolécules de Fe et d'Al est neutralisée à début de précipitation par Na OH 10 p. 100. Le précipité est redissout par le minimum de NO_3H, à chaud pour oxyder Fe^{++}. On amène à 20 cc environ, on ajoute 3 cc d'E. D. T. A. 0,1 m, on neutralise en présence d'une trace de rouge de méthyl et on porte doucement à l'ébullition pendant 2 à 3 minutes. On ajoute une quantité suffisante de tampon pH = 5, (HCl N : 60 cc, acétate de soude : 27 g p. 1 000 cc), on ajoute 50 cc d'eau froide.

On ajoute ensuite 3 cc de ferricyanure de potassium à 0,5 p. 1000 fraîchement préparé et 0,1 cc de diméthyl-3.3′ -naphtidine à 0,08 p. 100 dans l'acide acétique glacial (pour analyses).

On titre par une solution de zinc, aussi peu acide que possible, jusqu'à virage au rose.

On utilise des solutions 0,1 m et une microburette ; en titrant avec précaution en fin de dosage, la précision est de l'ordre de 0,006 à 0,008 cm^3 de solution 0,1 m.

On détermine par un à-blanc à pH = 5, la correction d'indicateur qui est de l'ordre de 0,016 à 0,020 cc, selon la pureté des réactifs (présence de ferrocyanure plus ou moins grande dans le ferricyanure, variation dans la concentration de l'indicateur Redox).

La réalisation correcte du dosage est surtout liée à la formation complète du complexe avec Al, c'est-à-dire apport d'un excès de réactif par rapport à Al et ébullition en milieu faiblement acide avec le réactif.

C. — Dosage de Ca et Mg.

Le dosage de Ca et de Mg sera basé sur la formation de complexes avec l'E. D. T. A. en présence de Murexide et de Noir d'Eriochrome T. L'intérêt de cette méthode est de pouvoir doser volumétriquement des quantités faibles de Ca et de Mg.

Néanmoins, un certain nombre de difficultés peuvent se présenter, et, en particulier, l'influence gênante de Fe et Al aux pH utilisés pour le dosage des alcalino-terreux.

Divers auteurs préconisent l'utilisation d'agents complexants vis-à-vis de Fe, Al, tels que les fluorures ou la triéthanolamine. Dans le cas

où ces ions sont très abondants, il est préférable de les séparer pour doser les alcalino-terreux. De plus, dans le cas de faibles teneurs en fer, ou en aluminium, la détermination directe de ceux-ci, sur la solution contenant des alcalino-terreux, alors abondants, devient plus délicate. Il faut, en effet, utiliser un partie aliquote importante pour doser Al + Fe, et une autre non moins importante pour doser Fe seul ; il est au contraire, plus logique de précipiter les hydroxydes, le précipité étant redissout pour y doser Fe et Al + Fe. On s'arrêtera donc à cette technique en choisissant les conditions opératoires pour séparer non seulement Al et Fe, mais aussi s'ils sont présents Ti et Mn, qui, de ce fait, ne gêneront pas ultérieurement.

Enfin, il faut noter que le dosage de Ca à l'aide de la murexide est rendu très difficile en présence de quantités importantes d'ions Na^{+}.

En effet, le dosage de 1 mg de Ca en solution diluée devient peu sensible en présence de 1 g de Cl Na. Or, la technique d'attaque de l'échantillon, introduit beaucoup de Cl Na qui gêneront le dosage : il est donc recommandable, sauf en cas de produit riche en Ca, de séparer auparavant Ca et Mg, du filtrat de précipitation des hydroxydes de Fe et d'Al.

1° Dosage de Mg.

On titre Mg^{++} par le Complexon III en présence de Noir d'Eriochrome T sans dépasser la limite supérieure de concentration de 0,02 m, (erreur $< 0{,}5$ p. 100), la solution 0,01 m commençant à précipiter dès pH 10,5.

On trouve en effet, pour des solutions 0,02 m, 0,04 m, 0,06 m, et 0,08 m, des erreurs croissantes respectivement de 0, — 0,5, — 0,75 et — 1,5 p. 100.

2° Dosage de Ca.

On titre Ca^{++} directement par la complexone III en présence de Murexide à pH 12 environ. La concentration ne doit pas dépasser 0,01 m.

3° Dosage de Ca + Mg.

Si Ca est présent lors du titrage de Mg par le Noir d'Iriochrome, on titre alors la somme Ca + Mg.

4° Dosage de Ca en présence de Mg.

On peut doser le Ca^{++} en présence de Murexide comme indicateur, lorsque le rapport moléculaire Mg/Ca est inférieur à 3. On a alors moins de 0,5 p. 100 d'erreur (voir fig. 4).

5° Dosage de Ca en présence de beaucoup de Mg.

Dans ce cas, il n'est pas possible de doser directement Ca^{++}, car le précipité de $Mg(OH)_2$ entraîne le Ca^{++} et les résultats sont trop faibles. On a préconisé un titrage en retour, ou, un titrage en retour, précédé d'une séparation de $Mg(OH)_2$ en présence d'un excès de complexon III.

Néanmoins, le virage du Murexide étant moins net dans le sens du rouge bordeaux au rouge, on préfère précipiter $Mg(OH)_2$ en présence de

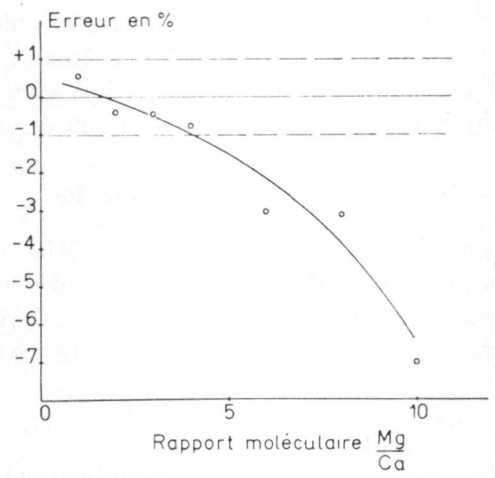


FIG. 4. — Erreur sur le dosage de Ca^{++} en fonction du rapport Mg/ca.

saccharose à pH 12 maximum. On sépare ainsi Mg et Ca que l'on peut doser chacun de leur côté. Une double précipitation peut-être nécessaire dans certains cas.

IV. — MARCHE DE L'ANALYSE

Les possibilités diverses d'utilisation de ces méthodes ainsi que la variété des compositions centésimales des minéraux argileux ou des silicoaluminates voisins, ont amené à préciser une méthode d'analyse permettant de doser les différents éléments dans les meilleures conditions.

A. — Détermination de H_2O^- et H_2O^+.

H_2O^- sera déterminé sur 2 g de substance finement porphyrisée et H_2O^+ sur 1 g les pesées d'échantillonnage étant effectuées simultanément pour éviter l'action des variations de l'humidité ambiante.

Ces valeurs sont d'ailleurs confirmables par thermogravimétrie.

On chauffera le premier échantillon à 105° et le deuxième à 850°. Le premier servira à la fusion alcaline, le second à l'attaque pour la détermination éventuelle des métaux alcalins.

B. — Fusion et dosage de SiOï.

On peut procéder à la fusion dans un creuset de platine avec le mélange eutectique CO_3Na_2-CO_3K_2 ou dans un creuset d'argent ou de nickel avec NaOH fondu.

Dans le cas de la fusion dans le nickel, on évitera de dépasser 400°-430° ; dans ce cas, le creuset ne sera pas attaqué. Le culot de fusion est repris à l'eau chaude ; on dissout ensuite les hydroxydes par HCl concentré et on fritte la silice par les méthodes classiques. On pèse SiO_2 après calcination. Le liquide d'attaque est amené à 200 cc.

C. — Détermination de la somme Fe + Al.

On prélève 3 cc de solution que l'on titre selon la technique décrite plus haut. (III B. paragraphe 5), avec 3 cc de Complexon III. On répète l'opération en faisant varier soit la prise d'essai, soit le volume de complexon pour se trouver dans les limites correctes de dosage.

D. — Détermination de Fe total.

On détermine le fer total par la méthode au bichromate (III. A.) sur une prise variable, en utilisant une liqueur titrée N/10 ou N/20, suivant la coloration de la liqueur et l'aspect du précipité que l'on obtient transitoirement au dosage précédent. Si le pourcentage de fer est très faible, on considèrera cette détermination comme approchée. Dans ce cas, on redissoudra par HCl 6 N les hydroxydes métalliques précipités pour la séparation des alcalino-terreux (voir plus loin, paragraphe G) et l'on titrera le fer à nouveau.

E. — Détermination de Fe^{++}.

Sur une prise convenable d'échantillon, on réalise une attaque sulfo-fluorhydrique (SO_4H_2 - 9 N : 10 cc, H_2O : 10 cc, F H conc. : 5-6 cc) à l'ébullition légère dans un courant de CO_2. On ajoute 100 cc d'acide borique à 6 p. 100 et 5 cc SO_4H_2 au 1/2. On refroidit et on titre par le bichromate 0,1 N ou 0,05 N (III. A).

F. — Détermination du groupe.

En possession de ces données, on peut grossièrement connaître le groupe auquel appartient le produit analysé. On pourra ainsi, sans trop

d'hésitation, choisir un procédé valable pour le dosage de Ca et de Mg (dont le rapport varie dans de grandes limites), en se référant au tableau V.

Tableau V

Caractéristiques analytiques des divers groupes d'argiles.

I. $SiO_2 < 38$ % *a)* $SiO_2 \leqslant 33$ % $H_2O^- + H_2O^+$ de 6 à 16 % H_2O^- très faible	Al_2O_3 de 14 à 25 %		*Chlorites* MgO/CaO très élevé CaO faible
b) $SiO_2 \geqslant 33$ % $H_2O^- + H_2O^+$ de 17 à 21 % $H_2O^- \geqslant H_2O^+$	Al_2O_3 de 10 à 17 %	$Al_2O_3 + Fe_2O_3$ de 18 à 23 %	*Vermiculites* MgO/CaO très élevé CaO très faible
II. SiO_2 de 38 à 46 % *a)* $H_2O^- + H_2O^+$ de 6 à 10 % $H_2O^-/H_2O^+ < 0{,}5$	Al_2O_3 de 8 à 18 %	Fe_2O_3 de 9 à 22 %	*Glauconies* MgO/CaO de 5 à 10 CaO faible
b) $H_2O^- + H_2O^+$ de 11 à 20 % $H_2O^+ = 14 \pm 3$ %	Al_2O_3 de 32 à 40	Fe_2O_3 de 0 à 2 %	*Kaolins* MgO/Cao # 0,5 — 5 Cao faible à très faible
c) $H_2O^- + H_2O^+$ de 17 à 22 % $H_2O^- \quad H_2O^+ > 1$	Al_2O_3 de 25 à 30 %	Fe_2O_3 de 25 à 30 %	*Nontronites* MgO et CaO faibles à très faibles
d) $H_2O^- + H_2O^+$ de 20 à 30 % H_2O^-/H_2O^+ de 0,5 à 1 %	Al_2O_3 de 8 à 14 %	Fe_2O_3 de 1 à 5 %	*Palygorskites* MgO/CaO parfois très élevé CaO faible à moyen
III. $SiO_2 > 46$ % *a)* $H_2O^- + H_2O^+$ de 6 à 10 % $H_2O^-/H_2O^+ \leqslant 0{,}5$ %	1° Al_2O_3 de 18 à 32 % ..... 2° Al_2O_3 de 8 à 18 %		*Illites* MgO/CaO > 1 CaO très faible ..... *Glauconies* MgO/CaO de 5 à 10 CaO faible
b) $H_2O^- + H_2O^+ \# 13$ % $H_2O^+ \# 12$ %	$Al_2O_3 \# 30$ %	$Fe_2O_3 < 2$ %	*Anauxites* MgO/CaO > 1 CaO très faible
c) $H_2O^- + H_2O^+$ de 17 à 22 % $H_2O^-/H_2O^+ > 1$	Al_2O_3 de 10 à 13 %	Fe_2O_3 de 18 à 20 %	*Nontronites* MgO et CaO très faibles
d) $H_2O^- + H_2O^+$ de 9 à 23 % $H_2O^-/H_2O^+ > 1{,}5$	1° Al_2O_3 de 15 à 21 % 2° Al_2O_3 de 8 à 12 % 3° $Al_2O_3 < 2$ %	Fe_2O_3 de 0 à 8 % Fe_2O_3 de 0 à 2 % $Fe_2O_3 < 1$ %	*Montmorillonites* MgO/CaO > 1 CaO faibes à moyen *Soponites* MgO/CaO élevé *Hectorites* CaO faible
e) $H_2O^- + H_2O^+$ de 20 à 30 % H_2O^-/H_2O^+ de 0,5 à 1	1° Al_2O_3 de 0 à 2 % 2° Al_2O_3 de 10 à 14 %	Fe_2O_3 de 0 à 4 % Fe_2O_3 de 1 à 5 %	*Sépiolites* MgO/CaO très élevé. CaO très faible *Attapulgites* CaO très faible
IV. Fe_2O_3 total > 6 — 7 % *a)* $FeO/Fe_3O_3 > 1$			Voir *Chlorites*
b) FeO/Fe_2O_3 de 0,1 à 0,5			Voir *Glauconies*
c) $FeO/Fe_2O_3 \# 0$		1° $Fe_2O_3 \leqslant 12$ % 2° $Fe_2O_3 \geqslant 15$ %	Voir *Vermiculites* Voir *Nontronites*

G. — Dosages de Ca et Mg.

On envisagera successivement tous les groupes définis dans ce tableau en indiquant la méthode permettant d'arriver à une bonne détermination.

1° Groupe des chlorites.

CaO est généralement absent ou très faible par rapport à MgO. Dans ce cas, on précipite Fe, Al, (Ti) à pH 8.

A 10 cc de solution (ou 50 cc, si Fe_2O_3 + FeO est supérieur ou égal à 28 p. 100 additionnés de 2 g de Cl NH_4, on ajoute après ébullition NH_4OH concentré jusqu'à pH 7 environ ; les hydroxydes métalliques précipitent, on attend 5 à 10 minutes. On fixe le pH à 8, en ajoutant NH_4OH 1/2, en opérant avec un pH-mètre. On laisse reposer et on filtre. On lave légèrement avec quelques cm^3 de tampon pH 8 (53 g de Cl NH_4 — 63 cc NH_4OH N — H_2O q. s. p. 1 000 cc).

On redissout par le minimum d'HCl à chaud. Pour cela, on place le filtre dans un bécher et on ajoute HCl au 1/2 jusqu'à dissolution complète. On dilue à 50 cc et on reprécipite comme plus haut, on filtre et on lave avec le mélange tampon.

Le précipité est conservé pour y doser éventuellement Fe total après redissolution par HCl 6 N.

Le filtrat est amené à 100 cc environ. On porte à début d'ébullition et on ajoute peu à peu NaOH concentrée, bouillie jusqu'à élimination de NH_4OH en chauffant d'abord légèrement, puis plus fort à la fin du dégagement. A la solution limpide (redissoudre si nécessaire un éventuel précipité), et amenée à 100 cc, on ajoute 0,5 g de CO_3NA_2 et 10 cc NaOH normale à chaud. On laisse 4 à 5 heures à tiède en couvrant, puis 24 heures à froid. On filtre en décantant, sur un petit filtre fin sans cendres, sans laver le précipité, qui restera dans le bécher. On redissout par 20 cc HCl N à chaud, versés sur le filtre et recueillis dans le bécher de précipitation. On neutralise par KOH, N, à pH 7, à l'aide d'un pH-mètre. On rince l'électrode. On amène ensuite à volume connu (100 cc) en lavant filtre et bécher à l'eau chaude.

a) Sur une prise de un quart (25 cc), on détermine la somme Mg + Ca On amène à 100 cc environ, on ajoute 0,5 cc d'NH_4OH concentré, 10 cc de tampon pH 10 (Cl NH_4 : 54 g — NH_4OH concentré 350 cc — H_2O q. s. p. 1 000 cc). Afin de complexer les traces de métaux des autres groupes, on ajoute encore 5 cc de triéthanolamine au 1/4, un peu de CNK, (quelques cg). On ajoute enfin un peu de chlorhydrate d'hydroxylamine. on titre à 50°, en présence de Noir d'Eriochrome T avec E. D. T. A. 0,1 m.

b) Sur le reste de la solution (75 cc), on détermine Ca seul. Pour cela, on place la solution dans un erlenmeyer de 250 cc et l'on fait bouillir doucement avec 1 goutte d'HCl pour chasser CO_2. On bouche et on fait refroidir sous l'eau. On ajoute rapidement 200 mg de saccharose et de la soude normale fraîchement préparée.

Soit v le volume d'E. D. T. A. 0,1 m utilisé pour le dosage de la somme Mg + Ca ; il faut ajouter :

$$(0{,}6\ v + 1)\ \text{cc de NaOH N.}$$

On bouche, on laisse reposer 24 heures, on décante sur un petit filtre bleu. On lave 1 fois avec 5 cc NaOH N/10 contenant un peu de saccharose. On redissout le précipité par 10 cc HCl N à chaud sur le filtre et dans l'erlenmeyer ; on neutralise, on complète à 50 cc environ, on fait bouillir, on bouche, on refroidit et on recommence la précipitation. On filtre après 24 heures, on lave avec NaOH N/10 saccharosé. Les 2 filtrats réunis sont acidifiés à nouveau par 5 cc d'HCl N, on fait bouillir ; on amène à pH 12 avec NaOH N en opérant de préférence avec un pH-mètre. On ajoute 300 mg environ de Murexide à 1 p. 100 dans le sulfate de potassium, et on titre par E. D. T. A. 0,1 m en présence d'un peu de CNK.

Pour les chlorites, la teneur en CaO trouvée sera toujours très faible.

2° Groupe des Vermiculites.

On opérera sur 100 cc de la solution d'attaque, comme dans le cas des Chlorites magnésiennes, en dosant le fer total après séparation.

3° Groupe des Sépiolites.

On précipitera les hydroxydes comme pour les chlorites, mais en opérant sur 100 cc de solution, avec double précipitation. Le précipité sera redissout dans NO_3H, la solution amenée à un volume connu, et on dosera Fe + Al, sur 1/4 environ et Fe sur les 3/4 restants, par les méthodes indiquées plus haut.

Le filtrat contenant Mg et Ca est amené à 100 cc environ. On chasse NH_4^+, et on précipite les carbonates avec 1 g de CO_3Na_2 et 20 cc NaOH normale.

Le précipité redissout est transvasé dans une fiole jaugée (100 cc). On dosera la somme Mg + Ca comme précédemment sur 10 cc et le Ca après séparation sur 50 cc (soude normale nécessaire à la précipitation de Mg : (v + 1 cc), v étant le nombre de cm^3 d'E. D. T. A. utilisés pour doser Mg + Ca.

4° Groupe des Attapulgites.

On opère comme pour les Sépiolites, en précipitant Al, Fe sur 50 cc et en titrant Mg + Ca sur 25 cc du précipité redissout amené à 100 cc et Ca sur le reste, après séparation en présence de saccharose.

Il n'est pas nécessaire de doser Al + Fe dans le précipité des hydroxydes, mais il est utile d'y doser Fe par le bichromate.

5° Groupe des Hectorites et Saponites.

Pour les Hectorites (silicates magnésiens), on s'en référera aux sépiolites qui présentent justement une composition centésimale très voisine.

Les Saponites seront traitées comme les Chlorites peu ferriféres (précipitation des hydroxydes sur 10 cc de solution), en conservant le précipité des hydroxydes pour doser le fer total.

Avec ce groupe, se terminent les minéraux à rapport MgO/CaO très élevé, et teneur en CaO faible à très faible.

6° Groupe des Montmorillonites.

La teneur en Al_2O_3 reste voisine de 20 p. 100, mais la teneur en Fe_2O_3 assez variable de 0 à 8 p. 100, exige une détermination de Fe sur le précipité des hydroxydes.

Celle-ci s'effectuera sur 100 cc de solution (correspondant à 0,5 g de produit). La somme Mg + Ca sera déterminée comme précédemment, après redissolution des carbonates, mais sur une prise correspondant à 200 mg de produit.

Enfin, sur une prise correspondant également à 200 mg de produit, on précipitera $Mg(OH)_2$, en présence de saccharose après avoir chassé NH_4^+ ; Ca^{++} sera donc séparé par double précipitation et dosé sur le filtrat.

7° Groupe des Illites.

On opère de même pour les illites et la glauconie.

8° Groupe des Palygorskites.

Même mode opératoire.

9° Groupe des Nontronites.

On dose Ca + Mg comme pour les montmorillonites (0,200 g de produit), puis Ca^{++} comme pour les kaolins (0,200 g de produit) ; si Ca^{++} est faible, sur le reste de la solution correspondant à 0,100 g, on

précipite Mg^{++} comme pour les montmorillonites et on dose de même, le calcium après séparation.

10° Groupe du Kaolin, Anauxite.

On précipitera les hydroxydes sur une quantité de solution correspondant à 1 gramme de produit, en réduisant auparavant le volume à 50 cc environ.

Le fer est dosé dans le précipité redissout par HCl. Le filtrat est amené à 100 cc. Sur 25 cc, on dose la somme Ca + Mg après avoir remonté le pH à 10 avec NH_4OH au 1/2.

Sur le reste de la solution, on déplace NH_4^+ par la soude, on redissout le précipité et on dose Ca^{++} directement par E. D. T. A., en présence de murexide, sans le séparer de Mg.

H. — Détermination de Ti.

Sur une prise, correspondant à 0,25 g environ (et particulièrement pour les groupes 2, 6, 7, 9 et 10), on dose Ti par colorimétrie. On ajoute 1,5 cc de SO_4H_2 concentré et on chasse la majeure partie de Cl^- à l'ébullition. On amène à 25 cc avec 5 cc H_2O_2 (10 volumes) et on colorimétrie à 546 mμ. Si les échantillons sont riches en fer, on ajoute PO_4H_3 concentré pour affaiblir la coloration due au fer. On opère de même pour la gamme d'étalonnage.

V. — DOSAGE DES ALCALINS

On dosera K^+ et Na^+ sur l'échantillon de 1 gramme ayant été chauffé à 850° pour déterminer H_2O^+. A cette température, CO_3Na_2, s'il existe, ne se volatilise que faiblement et Cl Na également (5).

A. — Ataque et séparation.

On utilisera la méthode LAWRENCE-SMITH qui permet à la fois la mise en solution et la séparation (2).

On porphyrise le produit et on en prélève 500 mg. On le mélange avec 0,5 g de Cl NH_4 et 3 g de CO_3Ca exempt d'alcalins, en opérant dans le mortier que l'on nettoie avec un peu de CO_3Ca. On chauffe un quart d'heure au-dessous du rouge (400°), puis une heure au rouge blanc quand tout l'ammoniaque a disparu ; on reprend par 75 cc d'eau, on passe dans une capsule de silice, on chauffe à ébullition lente, et on filtre. On lave à l'eau chaude, abondamment. Le résidu sur filtre doit être soluble dans HCl (2).

On ajoute à la solution un excès d'NH_4OH et de $CO_3(NH_4)_2$. On chauffe à 60° et on filtre. On effectue une double précipitation.

On lave à l'eau chaude en épuisant le précipité. On amène à sec dans le platine et on calcine doucement. On utilisera avec profit un four à creuset vertical, duquel on fera dépasser le haut du creuset, couvert et refroidi par un bécher plein d'eau. On reprend par quelques cm³ d'eau, additionnés d'oxalate d'ammonium, on laisse reposer, on filtre sur filtre fin et on lave. On chauffe avec un peu d'H_2O_2 pour détruire l'excès d'oxalate, on amène à sec, on chauffe légèrement et on maintient une nuit à 105°, on reprend par HCl N, on évapore l'excès d'HCl au bain-marie ; puis on reprend par l'eau et on filtre la solution des alcalins. On aura ainsi une solution contenant de 0 à 40 mg de K et de 0 à 15 mg de Na. On l'amène à un volume connu.

B. — Dosages.

La méthode la plus simple consiste à doser Na et K par photométrie de flamme après dilution convenable (6).

Si l'on étalonne l'appareil pour une concentration allant de 0 à 25 mg/litre pour le Sodium et 0 à 50 mg/litre pour le Potassium, on trouvera dans le tableau VI, les dilutions à observer et les interférences possibles.

TABLEAU VI

Dilution à observer pour le dosage photométrique de K et Na.

	Potassium % (1)	Sodium % (2)	Dilution pour K (3)	Dilution pour K (4)	Dilution Na (5)	Dilution Na (6)	Interférences K sur dosage Na (7)	Interférences Na sur dosage K (8)
Chlorites	0 ou traces	0 ou traces	50	1/1	50	1/1	0	0
Vermiculites	0 ou traces	0 ou traces	50	1/1	50	1/1	0	0
Sépiolites	0 à 0,025	0 à 0,26	50	1/1	50	1/2	0	25
Attapulgites	0 à 0,40	traces	50	1/1	50	1/1	40	0
Hectorites	0 à 0,20	0 à 2,3	50	1/1	50	1/20	0	230
Montmorillonites.	0 à 0,50	0 à 2,1	50	1/2	50	1/20	0	105
Illites Glauconies	2,7 à 6,9	0 à 1,1	50	1/20	50	1/10	30 à 70	6
Palygorskites	0 ou traces	traces	50	1/1	50	1/1	0	0
Nontronites	0 à 0,2	0 à 0,11	50	1/1	50	1/1	20	10
Kaolins	0 à 1,25	0 à 0,33	50	1/4	50	1/2	62	8

Dans les deux premières colonnes, on trouvera les teneurs extrêmes en K et Na (en p. 100) ; dans les colonnes 3 et 5, on a indiqué le volume de la solution des alcalins après attaque, dans les colonnes 4 et 6, les dilutions à effectuer pour les dosages de K et de Na, dans les conditions définies au paragraphe A (0,500 mg de produit).

Enfin, en 7 et 8, on trouvera les teneurs maxima en K dans la solution de dosage de Na et en Na dans la solution de dosage de K, exprimées en mg/litres.

On pourra ainsi prévoir les interférences possibles. On utilisera des solutions témoins de ClK et Cl Na contenant donc pour K de 0 à 300 mg de Na et pour Na, de 0 à 100 mg de K par litre.

CONCLUSION

Les techniques proposées, malgré la diversité du matériel étudié, permettent avec un minimum de temps le dosage rapide de Al, Fe, Ca, Mg, avec un matériel et des réactifs simples. La possibilité de recoupement ou de titrage en double ou triple exemplaire, augmente l'intérêt de la méthode exposée. Il est possible, avec une dizaine d'échantillons, d'effectuer toutes ces déterminations analytiques de minéraux argileux pendant le temps nécessaire aux déterminations thermiques (analyse thermique différentielle, gravimétrique, etc.), sans hésitations trop nombreuses sur les dilutions à réaliser et les prises d'essai à effectuer.

Reçu pour publication le 5 *février* 1959.

SUMMARY

The analysis of aluminium silicates (clay minerals) ; possibilities of the use of complexones

The techniques described are suitable for the rapid determination of Al, Fe, Ca and Mg, in the different materials studied, by means of simple equipment and reagents. The usefulness of the method is increased by the possibility of repetition and titration in pairs or three samples. All the determinations may be performed on about ten clay mineral samples within the time required for thermal analysis (differential thermal analysis, gravimetric determinations, etc.), without paying too much attention to dilutions and sampling.

ZUSSAMMENFASSUNG

Anwendungsmöglichkeiten der Komplexone bei der Analyse von Aluminium-silikaten (Tonmineralien)

Die vorgeschlagenen Verfahren machen es möglich in kürzesster Zeit Al, Fe, Ca, Mg mit einem einfachen Material und mit einfachen Reagenzien schnell zu bestimmen und dies trotz der Verschiedenheit des untersuchten Materials. Die Möglichkeit einer Titrierung in doppeltem oder dreifachem Exemplar steigert das Interesse dieses vorgeschlagenen Verfahrens. Es ist möglich, mit zehn Proben, alle diese analytischen Bestimmungen von Tonmineralien in der zur thermischen Bestimmungen (Differenzial Thermo-Analyse thermogravimetrische Analyse) notwendigən Zeit durch zuführen und zwar ohne all zu zahlreiche Zögerungen in Bezug zu den Verdünnungen und zu den Probenahmen.

Анализ кремнекислых солей алюминия (глинистые минералы). Возможность использования комплексон.

ГЕННЕЛОН. Авиньон.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Несмотря на разнообразие изученного материала, предложенные способы позволяют быстро определять Al, Fe, Ca и Mg с простыми приборами и реактивами. Возможность сопоставления результатов и двоекратного или троекратного титража увеличивает интерес изложенного метода. Можно, оперируя с десятком образцов, сделать все эти аналитические определения глинистых минералов в промежуток времени требующегося для термического анализа (термический анализ дифференциальный, весовой, и т. д.) без столь частых сомнений относительно того разбавления, что нужно осуществить, и взятия проб, что нужно сделать.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) GRIM. — Clay Mineralogy (p. 370 à 373). Mac Graw Hill 29, 1953.
(2) CHARLOT et BÉZIER .— Méthodes modernes d'analyse quantitative minérale. Masson et Cie, Paris 1945.
(3) FLASCHKA et ABDINE. — Mikrotitrationen mit E. D. T. A. XIII. Eine neue Methode zur Bestimmung von Al. *Mikrochim. Acta, Osterr,* nº 1, 37-43, 1955.
(4) SCHWARZENBACH. — Complexon. Publication de la Soc. Anonyme anct. B. Siegfried Zofingue, Suisse.
(5) GUENNELON. — Applications de la thermogravimétrie à l'étude des sols carbonatés. *Chimie Analytique,* 4e série vol. 39, nº 9.
(6) MAZOYER. — Dosage du K, du Ca et du Na par le photomètre à flamme. Station Agronomique. Antibes.
(7) MUSIL et THEIS .— Die komplexometrische Bestimmung des Fe mit Chromazurol S als Indikator. *Anal. Chem. Dtsch,* **144**, nº 5, p. 351-3, 1955.
(8) THEIS. — Direkte Bestimmung des Al mit Athylendiaminotetracetiksaüre (Komplexon III). *Z. Anal. Chem. Dtsch,* **144**, nº 2, p. 106-8 1955.
(9) DUVAL. — Traité de micro-analyse minérale. Presses Scientifiques Internationales. Paris 1956.

Le Directeur-Gérant : B. LACLAVIÈRE.

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 31-7-1959.

Dépôt légal: 2e trimestre 1959 *N° d'impression: 482*

552-321. 1 : 551-311. 22 : 631. 48 (44).

ÉTUDE COMPARATIVE DES PHÉNOMÈNES D'ALTÉRATION SUR GRANITE PORPHYROIDE DE LORMES ET SUR ANATÉXITES A CORDIÉRITE DU MORVAN-NORD ET DES SOLS QUI EN DÉRIVENT (1)

PAR

J. DEJOU

Ingénieur des Services Agricoles, Nevers.

PLAN DU MÉMOIRE

I. — Limites du Morvan-Nord. Aperçu géologique et but du mémoire.

II. — Étude pétrographique des deux socles intéressés.

1° *Granite porphyroïde de Lormes.*
Constitution minéralogique.
Composition chimique.

2° *Anatexites à cordiérite du Morvan-Nord.*
Variabilité de leur texture.
Constitution minéralogique.
Composition chimique.

III. — Comparaison des altérations de ces roches.

1° *Altération physique.*
A. — Sur Granite.
B. — Sur Anatexite.

2° *Altération chimique.*
A. — Technique d'étude de cette altération depuis la roche-mère jusqu'au sol.
B. — Objections à cette méthode de travail.
C. — Cas du Granite de Lormes.
D. — Cas des Anatexites : exemple de celles de Chastellux (Yonne).

3° *Étude du complexe d'altération : Détermination de la fraction argile.*

IV. — Les sols issus de ces roches-mères.

Les sols granitiques.
Les sols sur anatexites et complexe éruptif.
Analogies et différences essentielles.

V. — Bibliographie.

(1) Résumé d'une Thèse soutenue le 24 avril 1958 et dont le texte intégral est déposé au Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand.

I. — LIMITES DU MORVAN-NORD

Le Morvan-Nord, constitué uniquement de massifs cristallins primaires, occupe la région d'Avallon et de Quarre-les-Tombes (Yonne), et le canton de Lormes (Nièvre). Il est très bien délimité à l'ouest par la grande faille « séparatrice du Morvan » selon l'expression des géologues locaux, longue de plusieurs dizaines de km, à peu près rectiligne, et à puissant rejet qui coupe ces terrains cristallins des formations liasiques et jurassiques du Centre Nivernais. Elle se traduit nettement dans la morphologie par l'apparition d'une véritable barrière de terrains éruptifs surplombant la plaine Nivernaise sédimentaire qui bouche l'horizon lorsqu'on parcourt le département d'ouest en est, par exemple de Corbigny à Lormes ou de Chatillon-en-Bazois à Château-Chinon. Quelques belvédères permettent de bonnes observations topographiques ; citons le magnifique panorama de l'église de Lormes, au pied des terrains sédimentaires, et le croisement de la route Lormes-Clamecy et du chemin conduisant à Pouques-Lormes. La faille passe d'ailleurs à quelques mètres de ce point et l'on peut observer dans une prairie voisine, de part et d'autre d'un petit ruisseau, le calcaire jurassique de la bordure orientale du Bassin de Paris et l'arène granitique du Morvan.

Au Nord, la limite de la région est très tranchée sous l'angle géologique car elle coïncide avec la disparition des terrains cristallins qui au-delà d'Avallon cèdent le pas aux assises sédimentaires du Bassin Parisien. De même à l'Est, ils s'enfoncent sous l'Hettangien et le Sinémurien de la partie occidentale de la Bourgogne, transgressifs sur le socle.

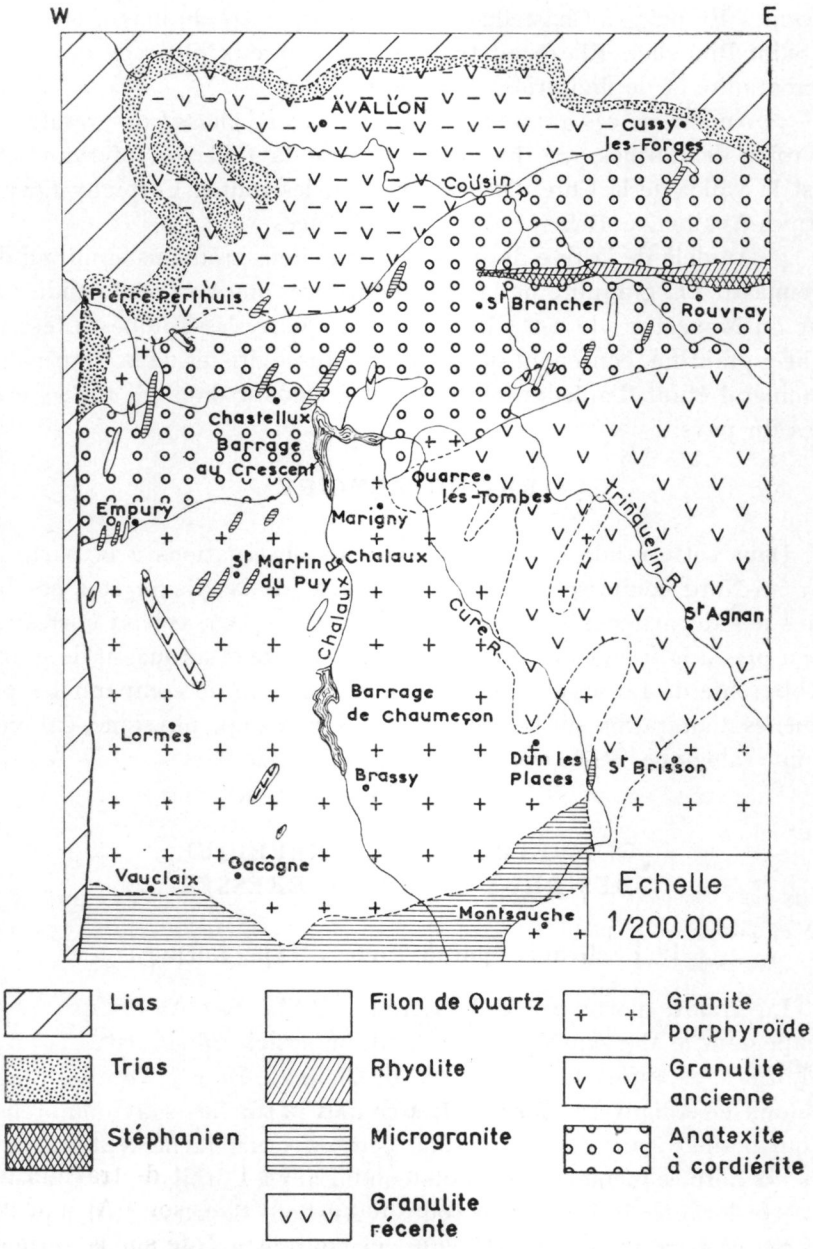
Si cette ceinture d'assises sédimentaires détermine à l'Ouest, au Nord et à l'Est des limites précises pour le Morvan-Nord, par contre, au Sud, ces dernières sont arbitraires, aucun événement géologique, pas plus que d'accident topographique n'étant intervenu pour le différencier de la partie centrale du massif autour de Château-Chinon.

Nous la fixerons dans cette étude à une ligne partant de Cervon et passant par Vauclaix, Gâcogne, Saint-Brisson, ce qui correspond à peu près au point de contact du granite de Lormes et du microgranite d'Ouroux.

APERÇU GÉOLOGIQUE

L'étude géologique du Morvan-Nord a fait l'objet de travaux de la part de A. MICHEL-LÉVY, consignés notamment dans son « Aperçu général sur la Constitution du Morvan » et dans sa « Note sur la formation gneissique du Morvan et Comparaison avec quelques autres régions de même nature », publiée en 1879. Tout récemment (1953), A. COCHET a consacré également un mémoire à cette région et c'est à cet auteur que

nous emprunterons les grandes divisions structurales. En allant du Nord au Sud, nous rencontrons les formations suivantes :



1° La Granulite rose à Biotite et Muscovite d'Avallon, s'étendant de Pierre Perthuis à Cussy-les-Forges.

2° Vient ensuite une frange Sud-Ouest-Nord-Est d'Anatexite à Cordiérite, depuis la grande faille séparatrice jusqu'au-delà du village de Saint-Brancher dans l'Yonne. Leurs affleurements principaux s'observent à Empury, à Chastellux qui occupe le centre du massif et à 1 km de Saint-Brancher. Elles sont truffées de nombreux filons de quartz, de microgranite et de digitations granitiques.

3° Au sud de ces anatexites s'étend le grand massif de granite porphyroïde de Lormes, que limitent à l'Ouest la faille du Morvan, et à l'Est la vallée de la Cure. On l'observe sur les routes Corbigny-Lormes, Lormes-Avallon, à Brassy et à Dun-les-Places.

4° Au-delà de la rive droite de la Cure, nous trouvons enfin un dernier massif : la granulite de la Pierre-qui-Vire, que l'on peut étudier autour du Monastère de cette localité, et à Quarre-les-Tombes. C'est une roche à grain fin, contenant de la Biotite-Muscovite, et de la Tourmaline, ce minéral étant d'ailleurs relativement abondant dans les roches éruptives du pays.

BUT DU MÉMOIRE

Dans cette étude, nous limiterons nos observations à la partie du Morvan-Nord comprise dans le département de la Nièvre et à ses bordures des départements de l'Yonne et de Côte-d'Or, ce qui correspond à peu près à la frange des Anatexites à Cordiérite et au massif de granite porphyroïde de Lormes. Le but de ce travail sera de comparer les phénomènes d'altération sur ces deux socles, sous l'angle physique, chimique et minéralogique, et de décrire les sols qui en dérivent.

II. — ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE DES DEUX SOCLES INTÉRESSÉS

1° Le Granite porphyroïde : Type Lormes.

Le granite porphyroïde de Lormes, étudié par A. COCHET (1953) occupe dans le Morvan-Nord une grande superficie ; il constitue la région de Lormes, de Saint-Martin-du-Puy, de Chalaux, Brassy, Dun-les-Places, Gouloux et Alligny-en-Morvan. Les coupes naturelles sont nombreuses, ce qui permet son examen que l'on peut effectuer facilement, en particulier à Lormes même, sur la route conduisant à Corbigny, et à la sortie de cette localité, le long de la route d'Avallon. Cependant, il n'est pas observable partout, car il est coiffé sur toute son étendue, d'une puissante couche d'arène pouvant atteindre 6 à 7 m.

Si, au départ de Lormes, on parcourt le massif dans toutes ses directions, on découvre une homogénéité assez remarquable dans son faciès.

Il s'agit d'un granite porphyroïde blanc grisâtre à reflets roses, à grands cristaux de feldspaths pouvant atteindre 3 à 4 cm de long et 1 cm de large, baignant dans une trame riche en Quartz et relativement pauvre en Biotite.

Constitution minéralogique.

L'examen microscopique montre les minéraux suivants :
Quartz.
Microcline anorthose ($2\ V = -64°$).
Oligoclase.
Biotite.
Chlorite (rare).
Apatite.
Minéraux opaques : rares, surtout Magnétite.

La structure est typiquement grenue. Le Quartz développe des sections xénomorphes intactes, mais quelques plages présentent une extinction roulante. Le Microcline anorthose est très abondant et montre de grands porphyroblastes, assez souvent parcourus par de fines fissures, traduction d'effets mécaniques à l'intérieur du granite et dans lesquelles peuvent s'accumuler des produits opaques.

Le plagioclase se présente en sections automorphes de taille supérieure à celle du Microcline, et bien plus grande que celles du Quartz. L'aspect des cristaux est très variable, à côté de plages intactes, bien saines, permettant la détermination d'une Oligoclase (An_{20} à An_{25}), on peut en observer d'autres où les clivages sont gagnés par des lamelles ténues de Séricite et qui témoignent déjà d'un début d'altération dans un échantillon pourtant très dur.

Quant à la Biotite, elle est en lames de quelques millimètres de long, et très faiblement chloritisée, sur certaines sections ; celles-ci sont effilochées à leurs extrémités, quelquefois cassées, toutefois leur polychroïsme est conservé et l'on note aussi la présence d'auréoles pléochroïques. Les minéraux opaques rares sont formés en majeure partie de granulés de Magnétite, dispersés sur l'ensemble de la lame.

Composition chimique.

On retrouve dans la composition chimique du granite du Morvan-Nord une remarquable homogénéité, tout comme dans les structures microscopique et macroscopique. L'analyse présentée ici est très voisine de celle qui figure dans la thèse d'A. MICHEL-LÉVY (1908).

De ce fait, les données chimiques du granite sont très voisines et permettent de le définir avec une part plus réduite d'incertitudes.

PARAMÈTRES C. P. I. W. TIRÉS DE L'ANALYSE 408 : 1 3' 2 3 (3112).

Il s'agit donc d'un granite hololeucocrate calco-alcalin, plus riche en plagioclases qu'en Microcline, à forte teneur en soude et en potasse, et de nature monzonitique.

Granite porphyroïde de Lormes (Nièvre).

	An. A. MICHEL-LÉVY (Thèse 1908) p. 224	An. M. THÉRON n° 408 Clermont-Ferrand (Juillet 1955) Echantillon R. 59
SiO_2	72,80	71,05
Al_2O_3	14,00	15,20
Fe_2O_3	2,50	2,12
FeO		0,70
P_2O_5		0,05
TiO_2		0,40
MnO		traces
CaO	1,20	1,27
MgO	0,90	1,17
K_2O	5,90	3,80
Na_2O	3,00	2,75
H_2O +		0,83
H_2O —		0,06
Total	100,30	99,40

2° Les Anatexites à Cordiérite du Morvan-Nord.

Ces roches sont moins faciles à observer que le granite de Lormes, mais de bons affleurements se rencontrent cependant à Moulin-de-Main, près de la commune d'Empury, sur les bords de la Briniane, à Chastellux, au-delà du pont de la Cure, et à proximité de Saint-Brancher. Le contact granite-anatexite s'observe à Berges à 3 km de Saint-Martin-du-Puy. Ces anatexites ont été décrites par A. MICHEL-LÉVY sous le nom de gneiss et c'est ainsi que les nomment certains agriculteurs de la région, puis par A. COCHET qui a procédé à leur exacte identification.

Contrairement au granite, leur faciès n'est pas identique dans tout le massif. A Moulin-de-Main, nous avons en général des roches à grain fin, à texture nébulitique, mais à Chastellux et à Saint-Brancher, le long de la vallée de la Cure, on rencontre une roche à grain un peu plus gros, d'allure plus ou moins embréchitique, où la schistosité cristallophyllienne est conservée. La texture varie de façon sensible d'un point à un autre, et cette sporadicité du faciès embréchitique les a fait ranger par A. COCHET dans les anatexites.

Constitution minéralogique.

L'étude de plusieurs lames minces au microscope polarisant révèle une composition minéralogique complexe ; par ailleurs, si les mêmes minéraux se rencontrent dans l'ensemble du massif anatexitique, par contre,

leurs proportions relatives sont fort variables. Ces minéraux sont les suivants :

Quartz.
Microcline sodique.
Plagioclases (Oligoclase ou Andésine).
Biotite.
Muscovite.
Cordiérite.
Minéraux opaques, surtout Magnétite.
Apatite.

Le Quartz, dont la teneur calculée oscille entre14 p. 100 et 35 p. 100, se présente sous forme de sections de dimension moyenne. Ses plages sont très transparentes et n'offrent pratiquement pas d'extinction roulante.

Plagioclases. — Leur détermination conduit soit à une Oligoclase, soit à une Andésine. Quelques cristaux portent la marque de cassures dues à des effets mécaniques, et la séricitisation le long des clivages est plus ou moins accusée.

Microcline sodique. — Ce minéral, toujours intact, est dans l'ensemble moins abondant que les feldspaths calco-sodiques.

Biotite. — Très abondante dans tout le massif, elle se rencontre en lames de dimensions variables, et dans un état d'altération plus ou moins avancé : intact à Empury, on observe dans les échantillons de Saint-Brancher une intense transformation en chlorite en même temps qu'une exsudation importante de produits opaques en granules d'Ilménite ou de Magnétite, ou en aiguilles de Rutile.

Muscovite. — Elle est beaucoup moins fréquente que la Biotite, et ne présente pas la moindre trace d'altération.

Cordiérite. — Ce minéral est exceptionnellement abondant dans tout le gisement du Morvan-Nord. On observe des cristaux automorphes de forme ronde ou ovale, disséminés dans toute la trame. Au centre, la cordiérite est intacte avec ses propriétés optiques voisines de celle du quartz. Mais sur le pourtour, on assiste à sa transformation en Pinite amorphe et en Gigantolite. Cette altération de la Cordiérite en Pinite et Gigantolite a toujours son point de départ au centre du cristal et jamais à la périphérie, ce qui permet d'imaginer, à la suite des travaux de M. Roques (1941), que dans ces transformations les variations de conditions physiques doivent jouer un rôle plus important que les phénomènes chimiques.

Changements de faciès à l'intérieur du massif, importance variable des différents minéraux, tels sont les caractères pétrographiques essentiels de ces anatexites du Morvan-Nord. Retenons toutefois — ce qui

assure au massif une certaine unité : l'abondance de la Cordiérite, et à un moindre degré de celle de la Biotite, et la rareté de la Muscovite.

Mais l'analyse chimique va faire éclater une hétérogénéité plus accusée encore.

Composition chimique des Anatexites du Morvan-Nord.

Trois analyses chimiques de ces roches ont été effectuées :

1° Échantillon n° 55, Moulin-de-Main, ouest du gisement.

2° Échantillon n° 80, Chastellux, 1 km au Nord du Pont de la Cure, centre du gisement.

3° Échantillon n° 75, Saint-Brancher, est du gisement.

Constitution chimique	Anatexite de Moulin-de-Main Analyse 14 Mlle Doparis Clermont, St. Agro. mai 1955	Anatexite de Chastellux Analyse 574 Mlle Y. Chaleil Clermont, juin 1956	Anatexite de Saint-Brancher Analyse 563 Mlle Y. Chaleil Clermont, mai 1956
SiO_2	55,65	65,80	60,25
Al_2O_3	21,16	15,72	17,46
Fe_2O_3	1,04	2,85	3,90
FeO	6,48	3,25	4,50
P_2O_5	0,12	0,18	0,19
TiO_2	0,95	0,65	0,70
MnO	tr.	tr.	tr.
CaO	0,76	0,95	0,60
MgO	3,78	2,10	3,00
K_2O	4,86	3,00	2,80
Na_2O	2,00	2,15	2,45
H_2O+	2,10	2,75	3,50
H_2O-	0,25	0,35	0,30
Total	99,15	99,75	99,65

L'hétérogénéité dans la composition minéralogique se retrouve donc dans la constitution chimique. Toutefois, nous devons dégager quelques caractéristiques fondamentales de ces roches :

1° Leur teneur exceptionnelle en Fer (8,24, 6,46 et 8,90 p. 100) en Fe_2O_3 total — liée à l'abondance de la Cordiérite et de la Biotite.

2° Leur richesse en MgO et K_2O.

3° Leur pauvreté en CaO.

4° Quant aux proportions de SiO_2 et Al_2O_3, elles varient en sens inverse. A l'ouest du massif, les roches sont les plus pauvres en SiO_2 et les plus riches en Al_2O_3, où la teneur atteint 21,16 p. 100. Au centre, SiO_2 a sa valeur maximum et Al_2O_3 minimum. A l'est, les pourcentages des deux oxydes sont intermédiaires. Le métamorphisme ne s'est donc pas exercé sur ces roches de manière uniforme.

III. — COMPARAISON DES ALTÉRATIONS DE CES ROCHES

1° Altération physique.

Arénisation du Granite de Lormes.

L'une des caractéristiques essentielles de ce granite — et ceci est un nouvel argument en faveur de son homogénéité — est la quasi généralisation de son intense altération physique acquise sur place, dans toute la région. Les coupes naturelles abondent sur toute l'étendue du massif et elles livrent le profil suivant :

1° Un horizon C_1 où la roche est fortement altérée.

2° Un horizon C_0, épaisse couche d'arène de 2 m à 7 m, formation cohérente aux affleurements, parcourue d'un réseau plus ou moins complexe de diaclases ou de fissures.

3° Un sol A de 10 à 25 cm se divisant parfois en deux horizons A et A_0.

Tout comme dans les sols granitiques d'Auvergne étudiés par D. COLLIER, nous n'avons pas observé à Lormes, pas plus que dans les autres carrières du Morvan-Nord, la présence d'horizon B où s'accumulent les complexes alumino-ferro-siliciques, qui ont quitté les horizons éluviaux. Pourtant un certain nombre de facteurs favorables à la podzolisation se trouvent ici réunis : nous avons un sol forestier à pH = 4,7, avec une végétation comprenant *Pteris aquilina*, *Sarothammus scoparius*, et de jeunes *Quercus pedonculata*, reposant sur une arène par définition perméable et dans une région relativement humide. Certes, des migrations d'argile et de fer ont lieu, puisqu'on décèle ces produits accumulés le long des fissures à l'intérieur de l'arène. Il est possible de rendre compte de cette absence de podzolisation en songeant, d'une part, à la relative richesse en bases de la roche-mère, et d'autre part, à la perméabilité très élevée de ces formations meubles, à tous les niveaux des diverses coupes, perméabilité encore accrue par le réseau des diaclases, de sorte que les substances migratrices sont incapables de se concentrer pour constituer un horizon bien défini. Il n'est pas impossible d'imaginer que les produits bloqués le long des fissures représentent peut-être les fragments d'un horizon B, très peu épais, complètement dissocié, et qui n'a pu demeurer en place.

L'altération physique des Anatexites du Morvan-Nord. Rareté des couches de Gore.

Les anatexites à cordiérite du Morvan-Nord se différencient du granite de Lormes par leur grande résistance à la désagrégation physique, à telle enseigne que les zones d'altération surmontant la roche-mère sont assez exceptionnelles.

A Empury, la roche très dure n'est altérée qu'à la faveur des diaclases. Le long des rives de la Cure, autour de Chastellux, même comportement. Tout au plus remarque-t-on un effritement superficiel qui ne dépasse pas une vingtaine de centimètres. Les seules couches de gore observables, de 1,50 m de puissance moyenne se rencontrent autour de Saint-André-en-Morvan et au-delà du Pont de la Cure, sur la route d'Avallon. Des filons de quartz les recoupent, indiquant une altération sur place, sans phénomènes de transport.

Par contre, le long de la vallée du Cousin, à l'est du massif, les anatexites voient leur altération progresser, sans qu'il y ait pour autant élaboration d'un horizon C_0.

Les conditions climatiques et la topographie étant identiques sur les deux socles, c'est la texture des roches qu'il faut invoquer pour rendre compte des différences d'altération avec le granite porphyroïde de Lormes. En effet, la grosseur du grain étant plus grande que chez les anatexites, les agents physiques de désagrégation ont plus d'emprise sur ce matériel, très sensible à une pulvérisation mécanique qui donne naissance à l'arène. De plus, la création de fissures consécutives à cette fragmentation facilite la circulation de l'eau qui s'enfonce plus profondément au sein du granite, celle-ci demeurant selon l'opinion de F. RINNE (1949), la cause principale de leur destruction.

2° Altération chimique globale depuis la Roche-Mère jusqu'au sol.

A. — Technique d'étude.

Il est intéressant de connaître l'intensité globale des phénomènes d'altération chimique depuis la roche-mère jusqu'au sol, et d'essayer de dresser un bilan minéralogique faisant apparaître les pertes ou les grains des constituants.

Dans ce but, nous avons appliqué la méthode suivante :

1° Détermination de la composition chimique totale de chaque ho-rizon d'un profil, en analysant l'ensemble des fractions cristallines.

2° Détermination de la composition minéralogique moléculaire de chaque horizon selon la méthode de P. NIGGLI (1936) revue ensuite par C. BURRI (1945) à partir de la » base » et des minéraux identifiés au microscope polarisant, méthode qui a l'avantage de s'appliquer aux domaines éruptif et cristallophyllien.

3° Calcul de la constitution minéralogique de chaque horizon, comparée à 100 de la roche-mère de référence, en supposant le quartz le minéral le plus résistant.

B. — Objections à cette technique d'étude.

Un certain nombre d'objections doivent être formulées à l'encontre de cette façon de procéder.

1° Tout d'abord elle suppose que les divers horizons C, C_0, A_1, A_0, sont disposés suivant un même profil et que l'homogénéité du gisement est satisfaisante. Or, ces conditions, assez exceptionnelles il est vrai, ne sont pas remplies dans le Morvan-Nord. En effet, dans les coupes examinées, aussi bien sur granite que sur anatexites, le socle n'est pas observable, de sorte que l'on se trouve dans l'obligation de prélever la roche saine en dehors du profil ; il se peut dès lors qu'en ce point, et ceci s'applique surtout aux anatexites, sa structure et sa composition chimique originelle puissent être différentes.

D'autre part, en ce qui concerne l'arène ou le gore, sa pulvérisation sur place conduit à un matériel que les analyses physiques et granulométriques révèlent hétérogène, et dont les données chimiques sont susceptibles de varier d'un point à un autre. De plus, dans le Morvan-Nord, en particulier à Brassy et Montsauche, des phénomènes de transport (solifluxion et cryoturbation) sont venus modifier la structure des arènes granitiques, de sorte que dans plusieurs situations, une fraction des matériaux de la coupe n'a pas été élaborée sur place.

Afin de limiter les causes d'erreur impossibles cependant d'être totalement éliminées, il faudra avoir soin de choisir des profils en *région plate* où les transports sont les plus faibles, et sur du matériel *dégradé sur place*, ce dont on s'assure par la recherche des filons recoupant les horizons C_0.

2° Si la méthode de P. NIGGLI et de C. BURRI a l'avantage de s'étendre aux domaines éruptif et cristallophyllien, et dès lors de permettre des comparaisons valables entre l'altération chimique du granite de Lormes et des anatexites du Morvan-Nord, son application se heurte à de sérieuses difficultés pour les roches métamorphiques. Celles-ci sont inhérentes à la nature même de ces roches, l'ensemble des migmatites étant caractérisé par l'absence d'équilibre de leurs édifices minéralogiques. Il est impossible de calculer l'ensemble de la paragénèse métamorphique du Morvan-Nord comprenant Quartz, Microcline, Cordiérite, Biotite et Muscovite, et partant de présenter une composition moléculaire exacte. D'où une source de difficultés et d'erreurs.

3° Enfin, les calculs ne font pas apparaître les produits nouveaux, de type argile, qui prennent naissance en cours d'altération, de sorte que la composition moléculaire des horizons supérieurs C_0, A_1, A_0 est entachée de nouvelles inexactitudes.

Quoi qu'il en soit, malgré ses imperfections, eu égard à la faible amplitude des processus chimiques sous nos climats tempérés, cette

Altération Chimique du Granite de LORMES

1°/ - ANALYSE CHIMIQUE de la TOTALITE des FRACTIONS MINERALES SUPERIEURES à 2 mm. et de la TERRE FINE INFERIEURE à 2 mm.

N° des échantillons	H_2O^-	H_2O^+	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	P_2O_5	TiO_2	MnO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Total
R.59 Roche fraîche An. 408 M. THERON. Clermont Juil. 1955	0,06	0,83	71,05	15,20	2,12	0,70	0,05	0,40	tr.	1,27	1,17	3,80	2,75	99,40
R.60 Roche altérée An. n°1 SAJOT-DEJOU	0,19	1,05	70,01	17,23	1,02	1,30	0,16	0,25	tr.	0,78	1,13	4,35	1,75	99,22
N°591 Arène profonde, An.2 SAJOT-DEJOU	0,45	2,25	68,88	18,31	1,04	0,29	0,10	0,15	tr.	0,61	0,80	5,60	1,60	100,08
N°594 Sous-sol An. 3 SAJOT-DEJOU	0,52	5,73	69,83	16,26	0,90	0,43	0,09	0,12	tr.	0,61	1,06	4;10	1,36	101,01
N°595 Sol An.4 SAJOT-DEJOU	0,95	4,81	70,41	16,34	0,83	0,43	0,09	0,07	tr.	0,67	0,74	3,97	1,37	100,63

façon de procéder peut conduire à des résultats intéressants, tant en ce qui concerne l'altération chimique dans son ensemble, que le devenir particulier de chacun des minéraux.

La dernière colonne exprimant les pertes de chaque minéral est très significative. Elle confirme la notion de grande résistance du Microcline

2°/ - Tableau des compositions minéralogiques moléculaires calculées des différents échantillons de LORMES .

Minéraux	Granite frais R.59	Granite altéré R.60	Arène profonde 591	Sous-sol 594	Sol 595
Quartz	36,23	40,04	35,02	42,72	43,65
Orthose	19,86	22,16	31,42	21,72	21,91
Albite	25,03	15,98	14,66	12,40	12,45
Anorthite	6,26	3,13	2,26	2,24	2,53
Corindon	4,89	9,59	9,73	9,69	9,85
Biotite	4,62	6,56	2,99	4,14	3,00
Ilménite	0,80	0,53	0,32	0,16	0,16
Magnétite	1,40	0,49	0,68	0,83	0,68
Apatite	-	0,28	0,28	0,28	0,28
H_2O totale	0,89	1,24	2,70	6,25	5,76
Total	99,98	100,00	100,06	100,43	100,27

3°/ - Constitution minéralogiques moléculaires des différents horizons comparées à 100 du granite de référence .

(Le quartz étant toujours supposé le plus résistant .)

Minéraux	Granite frais C	Granite altéré C_1	Arène 591	Sous-sol 594	Sol 595	Pertes de C à A_o	
						% de C	% de chaque minéral
Quartz	36,23	36,23	36,23	36,23	36,23	0	0
Microcline	19,86	20,05	32,48	18,42	18,18	1,68	8,45
Albite	25,03	14,46	15,15	10,51	10,33	14,70	58,73
Anorthite	6,26	2,83	2,33	1,90	2,10	4,16	66,45
Corindon	4,89	8,67	10,06	8,22	8,17	(- 3,28)	(+67,07)
Biotite	4,62	5,93	3,09	3,51	2,49	2,13	46,11
Ilménite	0,80	0,48	0,33	0,13	0,13	0,67	83,75
Magnétite	1,40	0,44	0,70	0,70	0,56	0,84	60,00
Apatite	-	-	-	-	-		
H_2O	0,89	1,12	2,79	5,30	4,78	(- 3,89)	(+437,08)
Total	99,98	90,21	103,16	84,92	82,97	17,01	

Résultats : Ils indiquent 17,01 % de pertes totales depuis C et A_0, ce qui dénote une altération chimique ménagée sous nos climats tempérés.

à l'altération chimique, signalée par D. COLLIER pour les granites du Massif Central, puisque 8,45 p. 100 seulement du minéral ont disparu, et met en évidence la fragilité des feldspaths calco-alcalins.

Quant à la biotite (46,11 p. 100 éliminés), elle apparaît plus résistante que les plagioclases totalement dégradés sur le terrain et réduits en une poussière blanchâtre, ou argilisés.

Ces remarques nous conduisent à énoncer les propositions suivantes :

a) *La kaolinisation de l'orthose ou du microcline des granites,* décrite

dans plusieurs traités, apparaît nettement exagérée puisque ce minéral pemeure presque intact, la quantité d'argile fournie sera donc faible. Nous ne faisons que confirmer sur ce point les observations de D. COLLIER (1951).

b) *La teneur en K_2O assimilable des sols granitiques du Morvan-Nord*, élément fondamental de l'équilibre NPK, ne résultera pas de l'altération des feldspaths potassiques, mais dépendra de la richesse en Biotite de la roche-mère, minéral libérant sa potasse. On comprend dès lors pourquoi la région de Lormes, bien que caractérisée par un stock très important en K_2O totale, ne soit pas cependant favorisée sous le regard de la teneur en cet élément utilisable pour les cultures.

La mobilité du fer apparaît avec une grande netteté ; il est éliminé sous forme de traînées plus ou moins jaunâtres, colorant notamment les plagioclases.

L'accroissement du corindon virtuel traduit les processus d'argilisation.

Quant au gain en H_2O, relativement élevé, il montre toute l'importance des phénomènes d'hydratation dans l'altération chimique, fait qui a recueilli les suffrages de tous les auteurs.

D. — Altération chimique des Anatexites à Cordiérite.

EXEMPLE DE CELLES DE CHASTELLUX (Yonne).

1° *Constitution chimique des horizons du profil de Chastellux.*

Analyses chimiques de la totalité des fractions minérales > 2 mm et de la terre fine $\leqslant 2$ mm.

2° *Compositions minéralogiques moléculaires des trois horizons dans la carrière de Chastellux.*

Nous avons en la circonstance tenu compte des observations microscopiques en calculant d'abord la Cordiérite, très abondante en lames minces, et nous avons appliqué la réaction chimique des zones profondes du métamorphisme, savoir :

$$\text{Muscovite} + \text{Quartz} \rightarrow \text{Microcline} + \text{Sillimanite}.$$

Il faut donc former du Microcline, ce qui élimine la possibilité de constituer de la Muscovite, et ensuite du Quartz. Nous aurons donc pour Chastellux : Cordiérite, Sillimanite, Microcline et Quartz ; cette composition très imparfaite se rapproche cependant le plus de celle décelée au microscope où la proportion de Muscovite est très faible et celle de la Cordiérite, Microcline et Quartz prépondérante. Toutefois, elle ne traduit pas la teneur en Biotite, relativement abondante et transformée

Constitution chimique des horizons du profil de Chastellux.

N° des échantillons	H_2O^-	H_2O^+	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	P_2O_5	TiO_2	MnO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Total
R.80 Anatexite pure An.n°574 Mlle CHALEIL Juin 1956	0,35	2,75	65,80	15,72	2,85	3,25	0,18	0,65	tr.	0,95	2,10	3,00	2,15	99,75
N°801 Gore Anatexitique - 1m20, Rte de St Germain des Champs. An. SAJOT-DEJOU n° 5	0,56	3,95	67,76	16,57	3,98	0,29	0,38	0,50	tr.	0,36	0,91	4,20	0,72	100,18
N°805 Sol 15-20 cm. An. SAJOT-DEJOU n°6	1,04	7,02	65,97	16,19	3,37	0,72	0,14	0,55	tr.	0,53	1,07	3,60	0,75	100,95

partiellement en Chlorite, de sorte qu'une fraction de K_2O ne sert pas à constituer du Microcline dont la proportion se trouve ainsi surestimée.

Minéraux formés	Anatexite pure R. 80	Gore anatexitique nº 801	Sol nº 805
Quartz	27,63	37,75	36,86
Microcline	17,78	25,62	21,76
Albite	20,00	6,63	6,96
Anorthite	4,00	—	1,70
Cordiérite	22,99	7,19	8,37
Biotite	0,78	—	—
Sillimanite	—	14,42	13,02
Magnétite	3,08	0,69	2,29
Hématite	—	2,42	0,88
Rutile	0,45	0,34	0,40
Apatite	0,28	0,57	0,29
H_2O	3,10	4,51	8,06
	100,09	100,17	100,59

3º *Constitutions minéralogiques des horizons de la carrière de Chastellux, comparées à 100 de l'anatexite fraîche.*

Minéraux formés	Anatexite fraîche R. 80	Gore anatexitique nº 801	Sol nº 805	Pertes de C à A	
				% de C	% de chaque minéral
Quartz	27,63	27,63	27,63	0,00	0,00
Microcline	17,78	18,75	16,30	1,48	8,32
Albite	20,00	4,85	5,21	14,79	73,92
Anorthite	4,00	—	1,27	2,73	68,25
Cordiérite	22,99	5,26	6,27	16,72	72,72
Biotite	0,78	—	—	—	—
Sillimanite	—	10,56	9,75	(gain) 9,75	gain
Magnétite et Hématite	3,08	2,28	2,37	0,71	23,05
Rutile	0,45	0,25	0,30	0,15	33,33
Apatite	0,28	0,42	0,22	0,06	21,43
H_2O	3,10	3,30	6,04	(— 2,94)	(gain) 94,84
Total	100,09	73,30	75,36	24,73	

Le gore anatexitique, assez semblable dans son aspect à une arène granitique, se caractérise à Chastellux par une concentration d'Apatite, et une élimination importante des feldspaths calco-sodiques ; CaO a totalement disparu et on ne peut former de l'anorthite. Les pertes en Microcline se chiffrent à 8,32 p. 100 (8,45 p. 100 dans le granite de Lormes).

La présence d'une quantité élevée de sillimanite virtuelle (9,75 p. 100) s'explique par l'argilisation des feldspaths calco-alcalins encore plus dégradés que dans l'arène granitique et aussi probablement de la cordiérite et de la biotite ; ces minéraux constituent dans le gore et le sol une véritable purée où il est souvent impossible de procéder à une identification très précise.

Le bilan général de l'altération fait ressortir des pertes totales plus

importantes (24,73 p. 100) depuis l'anatexite fraîche jusqu'au sol, que celles enregistrées sur le granite porphyroïde de Lormes (17,01 p. 100). A l'encontre des phénomènes physiques, les phénomènes chimiques sont donc plus intenses et ce caractère est plus net encore pour les gisements de Saint-Brancher et d'Empury.

La cause est essentiellement minéralogique ; les anatexites du Morvan-Nord sont en effet constituées d'un matériel plus vulnérable aux agents de l'altération, la cordiérite, les plagioclases et la biotite constituant au moins 50 p. 100 de la roche.

On peut d'ailleurs comparer graphiquement l'importance des phénomènes chimiques pris dans leur ensemble, à l'aide d'un unique diagramme de NIGGLI, où chacun des points est obtenu par application de formules donnant une représentation graphique des principales caractéristiques chimiques et minéralogiques du matériel étudié. La progression de l'altération depuis la roche-mère jusqu'au sol apparaît d'une manière synthétique, traduite par une courbe d'autant plus longue que les phénomènes sont plus intenses.

Coordonnées triangulaires Q. L. M.

1° *Granite de Lormes.*

Coordonnées	Granite frais	Granite altéré	Arène	Sous-sol	Sol
Q	57,8	60,3	58	63,1	64,2
L	32,7	28,5	31,5	25,3	25,3
M	9,5	11,4	10,5	11,6	10,5
	Point A				Point B

2° *Anatexite de Chastellux.*

	Roche fraîche	Gore	Sol
Q	55,1	62,2	62,75
L	26,8	21,4	20,50
M	18,0	16,3	16,75
	Point C	Point C′	Point D

3° *Anatexite de Saint-Brancher.*

	Roche fraîche	Roche altérée	Sol
Q	48,5	64,1	66,4
L	26,9	20,1	20,6
M	24,6	15,8	13,0
	Point E	Point E′	Point F

4° *Anatexite d'Empury.*

	Roche fraîche	Roche altérée	Gore	Sous-sol
Q	41,7	47,7	56,0	60,6
L	31,6	28,6	21,5	16,5
M	26,7	23,7	22,5	22,9
	Point G	Point G′	Point G″	Point H

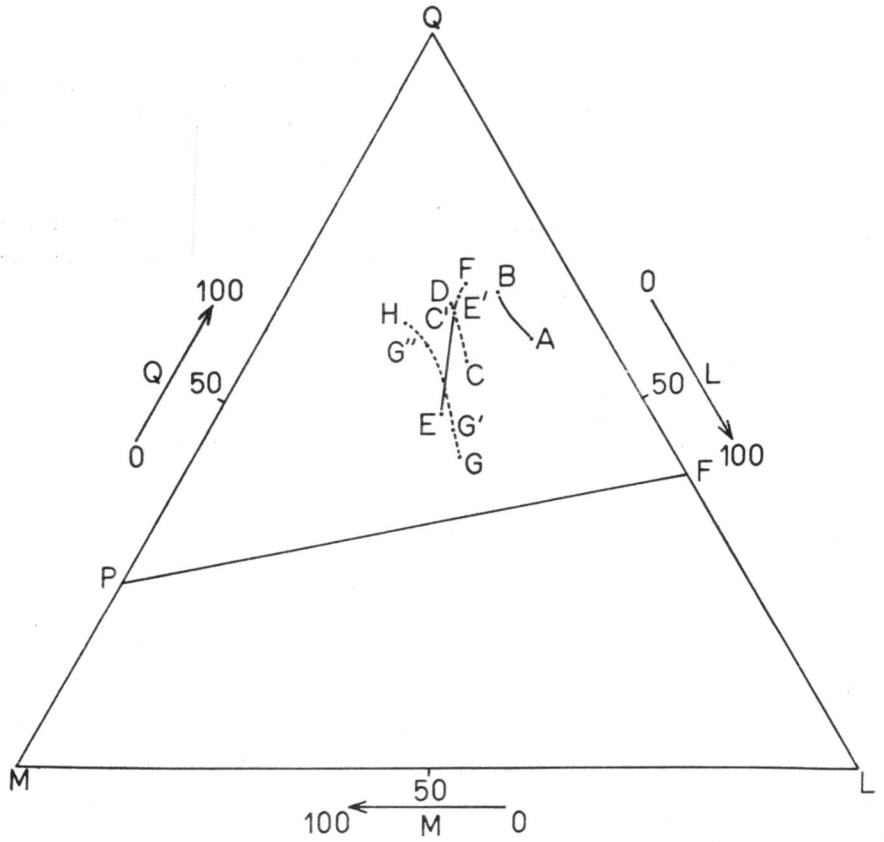


Diagramme de Niggli.

La seule lecture du diagramme permet de retrouver tous les résultats de l'étude chimique de l'altération. Pour le granite porphyroïde de Lormes, où ces phénomènes sont d'une faible intensité, la marche de l'altération est représentée par une ligne très courte AB où le point d'aboutissement B, résultante des caractéristiques du sol, ne s'écarte qu'assez peu du granite originel (point A).

La courbe CD, qui est presque une droite, témoigne d'une altération suivant un rythme régulier, chez les anatexites de Chastellux et légère-

ment plus accentuée que celle du granite de Lormes (AB). Or l'analyse avait révélé respectivement 24 p. 100 et 17 p. 100 de pertes totales.

La ligne EF (anatexite de Saint-Brancher) est deux fois plus longue que CD : 50 p. 100 et 24 p. 100 de pertes par le calcul. Quant à la courbe GH (anatexite d'Empury), elle est la plus irrégulière et salongueur est approximativement 2,5 fois CD : 71 p. 100 de pertes à l'analyse minéralogique.

Cette représentation graphique est par conséquent très suggestive et corrobore les données du laboratoire.

3° Examen succinct du complexe d'altération. Détermination de la fraction argile.

La détermination minéralogique de la fraction argile, qui représente la phase ultime de la désagrégation physique, est extrêmement délicate. Elle nécessite la mise en œuvre de plusieurs techniques qui doivent être confrontées, afin d'accroître la précision du diagnostic. Nous avons utilisé les méthodes suivantes pour cette identification :

1° Spectrographie aux rayons X.
2° Analyse Thermo-pondérale.
3° Analyse Thermique différentielle.
4° Analyse chimique totale et calcul des rapports moléculaires.
5° Microscopie électronique.

1° Argile extraite de l'arène ou du sol granitique.

La confrontation des diverses méthodes fournit une bonne concordance et amène à conclure que la phase la plus fine (particules < 2mn) est formée d'un mélange comprenant :

— de la kaolinite prépondérante,
— une fraction de quartz,
— une fraction de goethite.

Argile extraite du Gore anatexitique.

Elle est constituée du mélange suivant :
Kaolinite.
Illite (plus de 50 p. 100 des 2 argiles).
Quartz.
Goethite - Limonite.

Conclusions générales à cette étude comparative de l'altération.

Le granite de Lormes se caractérise donc par une puissante désagrégation physique à l'origine de la couverture d'arène qui le coiffe et par une altération chimique ménagée, s'exerçant surtout sur les plagioclases et à un moindre degré sur la biotite.

Les anatexites se distinguent du granite par une altération chimique plus poussée. D'autre part, la constitution du complexe d'altération est également différente, l'Illite étant le minéral le plus abondant.

IV. — LES SOLS DU MORVAN-NORD

L'étude comparée des sols reposant sur les deux grands massifs cristallins du Morvan-Nord (granite et anatexite) est le complément indispensable de cette première série de recherches. Si cet examen s'avère relativement simple sur le granite, il est au contraire particulièrement délicat sur le socle cristallophyllien, en raison du développement filonien extraordinaire qui complique le gisement des anatexites, à telle enseigne que les affleurements de la roche pure sont limités à une surface plus réduite que ne l'indique la feuille géologique d'AVALLON ; par voie de conséquence les sols d'origine spécifiquement métamorphique voient leur importance se restreindre ; il convient de noter à cet égard qu'ils sont presque exclusivement le domaine de la forêt, alors que les terres de culture et les prairies reposent sur un mélange pétrographique varié que nous avons dénommé : complexe anatexite-granite-granulite.

Dans ce résumé, nous nous limiterons *aux sols cultivés* et nous nous contenterons de marquer les analogies et les différences entre les deux types suivants :

1° Les sols granitiques.

2° Les sols sur complexe.

Analogies.

Ces deux types de sols possèdent un profil identique AC_0 ou A_0 A_1 C_0 ; ils sont essentiellement jeunes, peu évolués, de couleur grisâtre à brun clair, doués d'un puissant pouvoir de rajeunissement par érosion, et assez variables quant à leur teneur en humus. Il semble qu'ils correspondent assez bien à la définition de RANKERS non climatiques à MULL, de KUBIENA et Von FRANZ (1953) ; on peut aussi les qualifier lorsque leur évolution est un peu plus accentuée, de « sols bruns jeunes », affectés d'un lessivage latéral.

Différences entre les sols granitiques et les sols sur complexe.

Les sols sur complexe se distinguent des types granitiques par les caractères essentiels suivants :

1° Profondeur plus grande.

2° Proportion moyenne en terre fine plus élevée (de 10 p. 100 environ).

3° Texture physique sensiblement meilleure, grâce à une répartition mieux équilibrée des effectifs granulométriques.

4° Meilleure qualité des argiles, eu égard à la présence d'illites.

5° Teneur en matières organiques passant de 3 p. 100 à 3,5 p. 100.

6° Teneur en K_2O échangeable, très légèrement supérieure (0,17 p. 100 contre 0,21 p. 100).

Il y a interférence de ces différents facteurs, dont la résultante détermine un type de sol plus favorable aux cultures, et doué d'une potentialité de production qui l'emporte sur celle des sols granitiques des environs de Lormes, et même des autres sols du Morvan depuis Chastellux jusqu'à Luzy, à l'extrémité sud de la Nièvre.

Ces sols établis sur complexe, dans la zone Empury-Chastellux, résultent semble-t-il d'une heureuse symbiose entre les constituants physico-chimiques apportés par chacun des deux socles géologiques fondamentaux. Les types reposant sur Anatexite pure sont — avons-nous signalé — le domaine presque exclusif de la forêt, moins exigeante que les plantes cultivées qui prospéreraient avec difficulté dans un milieu de pH = 5, où la vie microbienne, notamment des Bactéries et des Actinomycètes, est alors notablement ralentie. Très mal pourvus en acide phosphorique assimilable, leur texture physique est par contre assez bonne, et lorsque les éléments fins (argile + limon) dépassent 40 p. 100, il y a une légère tendance à la compacité du sol. Un apport filonien de nature granitique vient dans une certaine mesure corriger ces insuffisances, tout en profitant lui-même d'une amélioration de ses propriétés physiques. L'argile cristallophyllienne accroît la capacité de rétention de l'eau de la partie éruptive, mieux alimentée ainsi en réserves hydriques, la fraction de ces sables grossiers diminue, ralentissant la perméabilité. Sa structure est améliorée, et le pourcentage de K_2O échangeable s'élève légèrement.

En revanche, à l'actif de la partie d'origine éruptive des sols sur complexe, il faut surtout mentionner l'apport d'un milieu à acidité moins élevée, plus apte au développement de la flore microbienne et mieux pourvu en acide phosphorique ; il y a bien association et interpénétration de deux milieux car chacun d'eux profite à l'autre.

Nous rejoignons donc le point de vue des agriculteurs qui ont depuis longtemps forgé leur opinion à la lumière des résultats culturaux obtenus sur ce mélange cristallophyllien et éruptif, opinion plus assise que celle qui découle de cette étude, puisqu'elle s'appuie sur le meilleur argument : la réponse des plantes.

Reçu pour publication le 6 *avril* 1959.

RÉSUMÉ

Dans cette étude, l'auteur limite ses observations à la partie du Morvan-Nord comprise dans le département de la Nièvre et à ses bordures des départements de l'Yonne et de Côte d'Or, ce qui correspond à peu près à la frange des Anatexites à cordierite et au massif porphyroïde de Lormes.

Ce mémoire permet de comparer les phénomènes d'altération sur ces deux socles, sous l'angle physique, chimique et minéralogique, et de décrire les sols qui en dérivent.

SUMMARY

A comparative study of processes of altération on porphyry granite at Lormes and on cordierite anatexites of northern Moravan, as well as on soils developed therefrom.

The present study is limited to that part of northern Moravan which is situated in the Nièvre department and extends to the bordering departments of Yonne and Côte d'Or, corresponding more or less to the fringe of cordierite anatexites and the porphyric massif of Lormes.

The processes of alteration on these two parent materials are compared from the physical, chemical and mineralogical point of view, and the soils developing therefrom are described.

ZUSAMMENFASSUNG

Vergleichbare Untersuchung der Verwitterungsvorgänge bei porphyroïden Granit von Lormes und bei Cordieritanatexit des Nord-Morvans uud der Abstammenden Böden.

In dieser Arbeit, begrenzen sich die Beobachtungen des Autors auf den nördlichen Teil des Morvans der im Nièvre Departement und am Rande der Yonne-und Côte d'Or Departements liegt, dies entspricht ungefähr dem Cordieritanatexitstreifen und dem porphyroïden Gebirge von Lormes.

Diese Arbeit macht es möglich die Verwitterungsvörgänge auf diesen beiden Sockel vom physikalischen, chemischen und mineralogischen Standpunkt aus zu vergleichen und der davon abstammenden Böden zu beschreiben.

Сравнительное изучение явлений выветривания лормского порфироидного гранита и кордиеритных анатекситов северного Морвана и почвы, которые из них получаются.

Ж. ДЕЖУ. Земледельческая Служба, город Nevers.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В настоящей работе, автор ограничивает свои наблюдения той частью северного Морвана, которая заключается в департаменте Ньевр и его краями в департаментах Ионн и Кот-д'Ор, что соответствует приблизительно полосе кордиеритных анатекситов и лормскому порфироидному массиву.

Эта работа позволяет сравнить явления выветривания на этих двух материнских породах с точки зрения физической, химической и минералогической и описать почвы из них получающиеся.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BASTISSE (E.). — Contribution à la détermination du type minéralogique des argiles des sédiments. Sols naturels en place et terres de culture. *1er Mémoire, Ann. Agro.*, 17e année, nº 3, p. 398-453 (mai-juin 1947).

BURRI (C.) et NIGGLI (P.). — Die Jungen Eruptivgesteine des mediterranen Orogens Bd. P. Publ. Vulkaninstitut Immanuel Friedländer, 3, 654 p., (1945).

CAILLÈRE (Mlle S.) et HENIN (S.). — Application de l'analyse thermique différentielle à l'étude des argiles des sols. *Ann. agro.* 17e année, nº 1, p. 23 à 72 (janv.-févr. 1947).

CAILLÈRE (Mlle) et HENIN (S.). — Sur la signification des résultats de l'analyse thermique différentielle. Extrait de la Revue « Verre et Silicates industriels », 11, rue du Gentilhomme, Bruxelles.

COCHET (A.). — La série cristallophyllienne et les granites de la partie N.-O. du Morvan. Diplôme Géologue Pétrographe, Clermont (1953).

COLLIER (D.). — Contribution à l'étude des terres noires de la Limagne d'Auvergne. Constitution et genèse. Thèse, Paris, Dunod (1949).

COLLIER (D.). — Contribution à l'étude de l'altération des granites et de l'évolution des sols sur les plateaux granitiques de l'Auvergne. *Bull. Ass. Franc. pour l'étude du sol*, p. 1-12 (juillet 1951).

HIRNE (G.) et LAMY (Ch.). — Aperçu d'ensemble sur les argiles céramiques. Identification des argiles par l'analyse thermique. *Bull. Soc. Franç. de Céramique*, nº 10 (janv.-mars 1951).

MERIAUX (Mme S.). — Contribution à l'étude de l'analyse granulométrique (1re thèse). *Institut Nat. de la Recherche Agronomique*, Série A, nº 590, 118 p., Paris, 1953.

MICHEL (R.). — Contribution à l'étude pétrographique des péperites et du volcanisme tertiaire de la Grande Limagne. *Mém. de la Soc. d'Hist. Nat. d'Auvergne*, nº 5, 140 p., Clermont, 1953.

MICHEL-LÉVY (A.). — Aperçu général sur la constitution du Morvan. B. S. G. F., 3e série, VII, p. 758-766 (1879*a*).

MICHEL-LÉVY (A.). — Note sur la formation gneissique du Morvan et comparaison avec quelques autres régions de même nature. B. S. G. F., 3e Série, VII, p. 858 (1879 *b*).

MICHEL-LÉVY (A.). — Les terrains primaires du Morvan et de la Loire, Thèse, Paris, 1908.

MILLOT (G.). — Relation entre la constitution et la genèse des roches sédimentaires argileuses (thèse). Extrait de Géologie appliquée et prospection minière de Nancy, nº 2-3-4. Tome II, 371 p. + 7 planches hors texte, 1949.

NIGGLI (P.). — Über Molekularnormen zur Gesteinsberchnung. *Schw. Min. Petr. Mitt.*, t. XVI, nº 2, p. 295, 1936.

RINNE (F.). — La Science des Roches. 3e édition Lamare, Paris, 1949.

RIVIÈRE (A.). — Les argiles complexes kaolino-illitiques. *Rev. de la Soc. Française de Céramique*, nº 13, oct.-déc. 1951.

ROQUES (M.). — Les schistes cristallins de la partie sud-ouest du Massif Central Français. Mémoire pour servir à l'explication de la carte géologique de France, 527 p., 1941.

ÉNERGIE D'ADSORPTION DES IONS MINÉRAUX PAR LES COLLOÏDES DU SOL ET NUTRITION MINÉRALE DES PLANTES (1)

DEUXIÈME PARTIE

Application des énergies d'adsorption à l'étude des sols.

PAR

R. BLANCHET

Station centrale d'Agronomie, Versailles.

PLAN DU MÉMOIRE

Potassium.

Description des sols progressivement enrichis.
Équilibres sols-solutions.
Signification physique du travail de désorption.
Variations saisonnières des concentrations d'équilibre et du travail de désorption.
Influence de la nature de l'argile des sols sur la dynamique du potassium.
Conclusions.

Phosphore.

Études sur un sol progressivement enrichi.
Techniques expérimentales.
Équilibres sols-solutions.
Vitesses de dilution isotopique.
Influence de la composition du sol.
Conclusions.

Le complexe colloïdal des sols est formé par la superposition de trois colloïdes principaux : les argiles, les hydroxydes métalliques et l'humus. Dans la plupart des sols de régions tempérées, les argiles et l'humus représentent grâce à leurs propriétés d'adsorption et d'échange les prin-

(1) Pour la première partie de ce travail, « Énergie d'adsorption de divers ions par des argiles pures », voir Ann. Agro. n° 1,1959

cipaux facteurs de la dynamique des cations. En première approximation, les capacités d'échange de l'argile et de l'humus peuvent être considérées comme sensiblement cumulatives dans le complexe colloïdal (41, 92). Toutefois, ces argiles sont incluses dans les agrégats de terre, et non à l'état libre comme celles qui ont été décrites ci-dessus ; leurs propriétés s'en trouvent souvent modifiées. D'autre part, on ne trouve généralement pas dans un sol une seule espèce d'argile, mais un mélange dans lequel il est très difficile de distinguer les proportions pondérales des diverses sortes d'argiles. Cette détermination ne peut guère être faite que de façon très approximative, en comparant l'intensité des raies obtenues sur les diagrammes de diffraction des rayons X (93).

En ce qui concerne les ions phosphoriques, les argiles interviennent surtout indirectement dans leur rétention, par l'intermédiaire de la double couche ionique qui les entoure (44, 56). Ils sont en outre énergiquement adsorbés par les colloides humiques et surtout par les hydroxydes métalliques mêlés à l'argile, ainsi que par le calcaire (33, 94, 95, 96, 97, 98). Des précipitations de phosphates ferriques ou calciques peuvent également intervenir. Enfin, une part souvent importante du phosphore du sol se trouve sous forme organique, dans les matières en voie de décomposition microbienne (99). On rencontre dans tous les sols deux formes principales de phosphates : les ions PO_4 adsorbés par l'argile, l'humus et les hydroxydes métalliques, et les phosphates organiques. Dans certains cas s'y ajoutent des phosphates précipités. Les ions PO_4 précipités se dissolvent en fonction des produits de solubilité. Quant aux phosphates organiques, ils sont lentement libérés au cours de la décomposition microbienne. Sauf dans les cas relativement rares où la concentration en P de la solution du sol ne dépend que d'un produit de solubilité, les plantes s'alimentent essentiellement aux dépens des ions PO_4 adsorbés, isotopiquement diluables (47, 50, 101). La nutrition de la plante n'est toutefois pas proportionnelle à la quantité de P adsorbée, il faut considérer dans les divers sols les activités et les énergies d'adsorption (50).

En étudiant la nutrition phosphatée et potassique de la plante dans le sol, on est donc amené à considérer surtout des équilibres sol/solution, c'est-à-dire les concentrations d'équilibre, les énergies d'adsorption, et les vitesses de désorption. L'ensemble des techniques utilisées dans l'expérimentation sur les argiles pures peut être appliqué également aux sols, en tenant compte des réactions secondaires qui interviennent souvent.

A. — POTASSIUM.

L'énergie d'adsorption du potassium a d'abord été étudiée en détail sur des sols progressivement enrichis par des apports d'engrais. Puis d'autres sols différents surtout par la nature des argiles ont été examinés.

1° Description des sols progressivement enrichis.

Il s'agit d'un sol de limon du Centre National de Recherches Agronomiques de Versailles. Les échantillons utilisés proviennent d'une expérience de longue durée destinée à l'étude de l'évolution des sols sous l'effet d'apports successifs d'engrais. Cette expérience a été commencée en 1929 par A. DEMOLON. Les parcelles à engrais potassiques reçoivent 210 kg de K par hectare et par an, sous forme de ClK. Les engrais sont apportés chaque année à l'automne, et enfouis par un labour. Le sol est habituellement laissé sans culture, les mauvaises herbes sont régulièrement détruites. Une seule culture a été effectuée à titre d'essai, en 1943. Ce sol était initialement assez pauvre en éléments fertilisants ; les parcelles sont maintenant très riches en l'élément qui leur a été apporté. Chaque année, des prélèvements de terre sont effectués dans toutes les parcelles, à différentes époques. On peut donc suivre ainsi les modifications qui sont intervenues peu à peu dans la composition du sol.

La composition initiale de ce sol était la suivante :

Analyse physique		Analyse chimique	
Sable grossier	2,6 %	Colloïdes humiques (Méthode Chaminade	1,23 °/oo
Sable fin	61 %	Ca échangeable	2,7 °/oo
Limon	15,2 %	K échangeable	0,062 °/oo
Argile	15,3 %	Mg échangeable	0,18 °/oo
Calcaire	0	pH	6,4
Matières organiques	3,9 %		

L'argile est de type micacé (illite) ; elle n'est pas « ouverte », dans le cristal les feuillets sont étroitement accolés les uns aux autres, grâce aux ions K^+ qui servent de tenons (102). Les bilans de potassium font apparaître une rétrogradation assez intense durant les premières années de l'enrichissement (103, 104).

2° Equilibres sols-solutions.

a) **Techniques expérimentales.** — De même que dans l'étude des argiles, le potassium échangeable est extrait par une solution en équilibre avec l'adsorbant, c'est-à-dire avec le sol en place. Ici, cette condition est particulièrement importante, elle donne la certitude que le complexe colloidal n'est pas altéré par le traitement. Il faut donc effectuer la désorption dans une solution identique à la solution du sol. C'est d'ailleurs le milieu dans lequel les plantes s'alimentent.

Outre le potassium, les cations que renferme la solution du sol sont essentiellement le calcium, le magnésium et les ions H^+. Il est très difficile d'extraire cette solution du sol au taux habituel d'humidité de celui-ci (environ 25 p. 100 d'eau), car elle est énergiquement retenue à la sur-

face et à l'intérieur des particules de terre. Nous avons plutôt augmenté progressivement le volume d'eau mis au contact d'un poids donné de sol, dosé les concentrations en Ca et Mg des solutions obtenues, et, en traçant la courbe représentant ces concentrations en fonction du rapport sol /eau, extrapolé à sol/eau = 3/1 (sol humide à 25 p. 100 d'eau). Le potassium a ensuite été extrait par une solution contenant ces quantités de Ca et Mg, apportées sous forme d'acétates pour tamponner suffisamment la solution au pH du sol (solution contenant 220 mg/l Ca et 15 mg/l Mg, pH 5,9). Cette solution placée au contact du sol à des rapports sol/solution très variables ne s'est pas modifiée ; elle est donc bien en équilibre avec les colloides adsorbants, et l'extraction de K par cette méthode représente des conditions aussi voisines que possible de celles du sol en place.

Cette extraction a été effectuée en mettant au contact d'un poids donné de sol des quantités croissantes de solution calco-magnésienne. Pour un rapport sol/solution élevé (peu de solution par rapport au poids de sol), la quantité de potassium extraite est faible, et la solution est relativement concentrée en K. Quand on augmente le volume de solution mis au contact du même poids de sol, la teneur en K de cette solution diminue, mais la quantité de K extraite par unité de poids de sol augmente, car il y a désorption d'une partie de l'élément fixé. Pour un rapport sol/eau suffisamment bas, on extrait ainsi la totalité du potassium échangeable.

Les mélanges sol-solution étaient placés au thermostat jusqu'à l'obtention de l'équilibre, à quatre températures : 17°, 30°, 50° et 65°C. La solution était ensuite séparée du sol par filtration. La détermination de la concentration en K de cette solution permet de connaître la quantité extraite par unité de poids de sol. Les extractions ont porté sur les prélèvements de novembre, effectués avant les apports d'engrais, des années 1929, 1932, 1936, 1943 et 1955. Pour chacun de ces échantillons, les rapports sol/solution suivants ont été réalisés : 3/2, 1/1, 1/2, 1/4, 1/10, 1/20, 1/50, 1/100, 1/200. Les teneurs en K échangeable de ces divers prélèvements ont été déterminées d'autre part, par percolation avec une solution normale et neutre d'acétate d'ammonium.

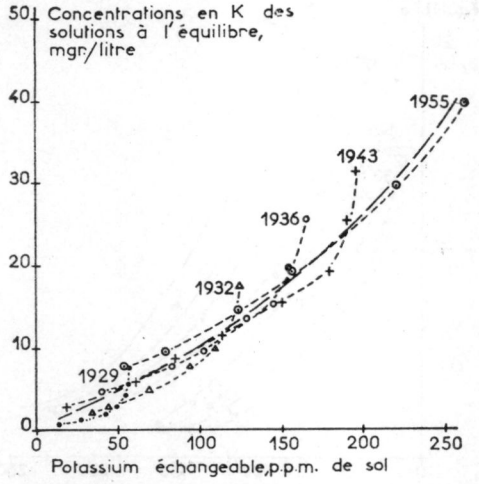
b) **Résultats.**

1° *Équilibre entre le potassium échangeable et les solutions placées au contact du sol.*

A chacune des extractions on obtient à l'équilibre une solution de concentration en potassium c, correspondant à une quantité extraite q de K échangeable. Connaissant la teneur Q en K échangeable total, on en déduit la quantité restant fixée r :

$$r = Q - q$$

Le graphique 19 représente en fonction des valeurs de r les concentrations d'équilibre c observées à 17° aux divers rapports sol/solution, pour les cinq échantillons de terre (1929, 1932, 1936, 1943, 1955). L'ensemble des points définit bien une courbe moyenne. Ces différents points correspondent à des rapports sol/solution extrêmement variables (1/0, 66 à 1/200) et à des sols prélevés en place à 25 ans d'écart. La représentation restant homogène malgré la très grande diversité des conditions, on peut affirmer qu'il existe un équilibre bien défini entre une quantité donnée de K fixée à l'état échangeable, et la concentration de la solution en équilibre avec le sol. En particulier, le volume de la solution n'intervient pas : une même quantité de K échangeable est en équilibre avec une même



GRAPHIQUE 19. — Equilibre entre le K échangeable et les solutions en contact avec le sol.

concentration, que le volume de solution en contact avec un gramme de sol soit de 0,66 cm³ (sol de 1929) ou de 200 cm³ (sol de 1955).

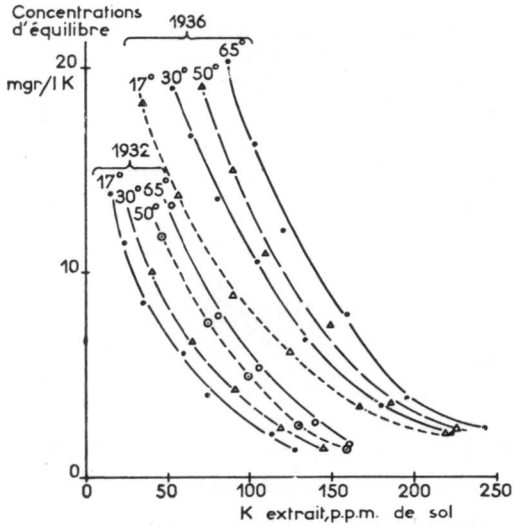
La force ionique de toutes ces solutions est sensiblement identique, la concentration du calcium (bivalent) étant bien supérieure à celle du potassium (monovalent). Dans :

$$\mu = \frac{1}{2} \sum m_i Z_i^2$$

m_i : concentration molaire de l'espèce ionique i
Z_i : valence de l'ion

μ peut être considéré comme constant. (Outre Ca^{++} et K^+, d'autres ions de concentrations constantes interviennent dans le calcul de μ, notamment $CH_3\text{-}COO^-$ et Mg^{++}). Le coefficient d'activité γ des ions K^+ est donc également constant. Ainsi, une quantité quelconque de potassium fixée échangeable peut être caractérisée par une activité définie des ions K^+ dans la solution en équilibre avec le sol.

La courbe moyenne représentée sur le graphique 19 indique cette relation entre les teneurs en K échangeable et l'activité des ions K^+ dans les solutions à l'équilibre. Elle a la forme d'une courbe d'adsorption. Toutefois, si l'on applique la loi de Langmuir aux résultats relatifs à chacun des échantillons de terre (prélèvements de 1929, 1932), on n'obtient pas pour chacun d'eux une seule droite, mais plusieurs segments bien distincts, de pentes différentes. Il en est de même si l'on se rapporte à la loi de Freundlich. Cela indique que l'adsorption du potassium dans ce sol ne s'effectue pas selon un mode uniforme, mais par plusieurs processus différents (105).



GRAPHIQUE 20. — Influence de la température sur les concentrations d'équilibre.

2° *Influence de la température sur les équilibres. Interprétation énergétique.*

Le graphique 20 représente en fonction des quantités de K extraites les concentrations d'équilibre obtenues aux différentes températures, sur les échantillons de 1932 et 1936. Pour une même quantité de potassium restant adsorbée, les concentrations d'équilibre augmentent avec la température, indiquant que la réaction d'adsorption est exothermique. Il en est de même pour les sols de 1929, 1943 et 1955. Le mode d'interprétation exposé dans l'étude des argiles pures a été appliqué également ici ; les conditions sont comparables, les rapports de concentrations sont égaux aux rapports d'activités.

Le tableau de la page suivante indique les chaleurs d'adsorption observées sur les différents échantillons à divers stades de l'épuisement, entre 17° et 30°.

Toutes ces valeurs sont du même ordre, soit environ — 2 500 calories par ion-gramme. Ces résultats se rapprochent étroitement de ceux qui ont été obtenus au cours de la désorption du potassium à partir de la kaolinite pure. Les mécanismes apparaissent les mêmes : dans un système très voisin de l'équilibre, les ions K^+ s'adsorbent lorsque la chaleur d'adsorption compense leur diminution d'entropie. Celle-ci est voisine de — 8 calories par degré et par ion-gramme. S'il existe dans ce sol plusieurs modes d'adsorption, leurs caractéristiques thermiques sont néanmoins très voisines.

Année du prélèvement	K restant adsorbé p. p. m.	$\Delta\bar{L}$
1929	42	— 2830 cal./ion-gramme
1929	32	— 2560
1929	12	— 2830
1932	81	— 3190
1932	46	— 3030
1932	16	— 2830
1936	93	— 2990
1936	43	— 2750
1936	13	— 2550
1943	125	— 2240
1943	95	— 1710
1943	45	— 2620
1943	5	— 3400
1955	183	— 1920
1955	123	— 2330
1955	63	— 2390
1955	5	— 3160

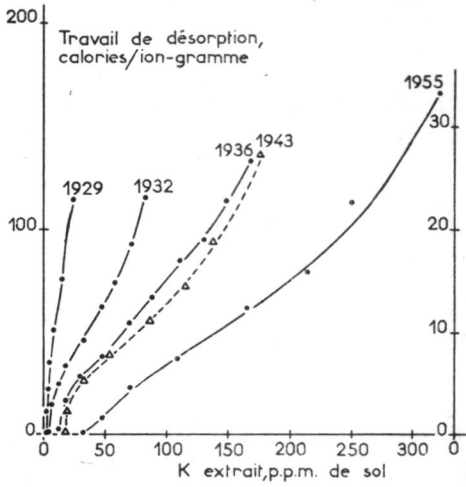
Le travail de désorption $\Delta\bar{G}'$ a été calculé à partir des courbes de désorption obtenues sur chacun des échantillons, d'après la relation habituelle :

$$\Delta\bar{G}' = RT \ln \frac{a_i}{a_x}$$

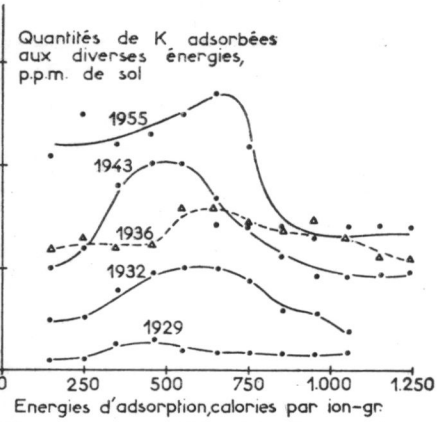
a_i désigne ici la concentration des ions K^+ dans la solution du sol en place, et a_x les diverses concentrations de désorption. En réalité, la concentration exacte des ions K^+ dans la solution du sol en place est difficile à déterminer ; comme pour Ca^{++} et Mg^{++}, on peut l'obtenir par extrapolation en considérant des rapports sol/solution de plus en plus élevés. Cette extrapolation est cependant beaucoup moins sûre, car on obtient pour le potassium une courbe plutôt qu'une droite. En fait, la quantité de potassium extraite par unité de poids de sol au rapport sol/solution = 3/2 est faible, et, pour partir d'une base plus sûre, on peut calculer le travail de désorption en désignant par a_i la concentration d'équilibre au rapport sol/solution = 3/2. Cela revient à négliger le travail de désorption entre sol/solution = 3/1 (sol en place à 25 p. 100 d'eau) et sol/solution = 3/2.

La quantité de potassium désorbée dans cet intervalle étant très faible, on ne commet pas d'erreur importante. De toutes façons, les valeurs obtenues sur différents sols restent comparables entre elles, conformément à l'objectif principal de ce travail.

Le graphique 21 représente les valeurs de $\Delta\overline{G}'$ en fonction des quantités de K extraites des divers sols. On obtient une famille de courbes : au cours de l'épuisement, $\Delta\overline{G}'$ augmente d'autant plus fortement que le



GRAPHIQUE 21. — Travail de désorption, en fonction des quantités de K extraites.



GRAPHIQUE 22. — Répartition du potassium entre les diverses énergies d'adsorption, à différents stades de l'enrichissement.

sol a été moins enrichi. Ainsi, un travail de désorption de 500 calories par ion-gramme K^+ correspond à l'extraction préalable de :

1929 : 12 p. p. m. K
1932 : 37 p. p. m. K
1936 : 65 p. p. m. K
1943 : 80 p. p. m. K
1955 : 42 p. p. m. K

Le nombre d'ions K^+ fixés de telle sorte que leur désorption exige moins de 500 calories par ion-gramme est donc beaucoup plus grand en sol enrichi. De même, l'extraction d'une quantité donnée de potassium exige d'autant moins d'énergie que le sol est plus enrichi. Les courbes présentent divers points d'inflexion indiquant, comme l'application de la loi de Langmuir, des processus d'adsorption un peu différents.

3° Signification physique du travail de désorption.

A partir de ces courbes (graphique 21), il est possible d'examiner la répartition des ions K^+ entre les divers niveaux d'énergie d'adsorption. Les quantités de potassium retenues à ces divers niveaux d'énergie

d'adsorption sont définies par les différences d'abscisses correspondant à des différences d'ordonnées convenablement choisies. Soient q_1 la quantité de potassium extraite quand il a été fourni par ion-gramme le travail $\Delta\overline{G}'_1$, et q_2 la quantité extraite quand il a été fourni $\Delta G'_2$,

$$(q_2 > q_1,\ A\overline{G}'_2 > \Delta\overline{G}'_1).$$

Nous disons que la quantité de potassium q :

$$q = q_2 - q_1$$

est adsorbée avec une énergie moyenne G telle que :

$$G = \frac{\Delta\overline{G}'_2 + \Delta\overline{G}'_1}{2}$$

Ainsi, dans le sol de 1955, la quantité de K extraite quand il a été fourni par ion-gramme de 400 à 500 calories est de 20 p. p. m. L'énergie moyenne d'adsorption de ces ions est de 450 calories par ion-gramme.

Nous avons signalé dans l'étude des argiles pures que $\Delta\overline{G}'$ était un travail *relatif*, calculé par rapport à une activité initiale a_i qui était alors choisie arbitrairement. Ici, a_i n'est plus arbitraire, c'est l'activité des ions K^+ qui se trouvent à l'état libre dans la solution du sol en place (ou plutôt une valeur voisine et mieux définie, celle des ions en solution au rapport sol/solution = 3/2). Le travail de désorption $\Delta\overline{G}'$ indique donc l'énergie réelle qu'il faudrait fournir aux ions K^+ pour obtenir leur désorption dans la solution du sol au rapport sol/solution = 3/2. Il permet d'examiner la variation de l'énergie d'adsorption des ions K^+ dans les sols progressivement enrichis

Le graphique 22 indique la répartition du potassium aux différents niveaux d'énergie d'adsorption, dans chacun des sols. Les courbes ont toutes la même forme : plus les apports d'engrais ont été importants, plus les quantités de potassium adsorbées aux divers niveaux d'énergie sont grandes.

On aurait pu penser que, dans le sol initial pauvre, tout le potassium était adsorbé avec une grande énergie, et que les ions K^+ introduits par les engrais se fixaient ensuite avec des énergies de plus en plus faibles. Il n'en est pas ainsi. Le potassium des engrais se surajoute au potassium préexistant, selon des énergies d'adsorption sensiblement identiques. Il se dilue en quelque sorte dans le potassium préexistant, selon un processus comparable à celui de la dilution isotopique des ions phosphoriques. Il n'en reste pas moins vrai que la quantité de potassium extraite avec un travail donné est beaucoup plus grande en sol riche qu'en sol pauvre.

Le travail de désorption représente les différences d'enthalpie libre partielle molaire des ions K^+ qui se désorbent successivement au cours de l'épuisement, ou, si l'on veut, la différence entre l'enthalpie libre par-

tielle molaire des ions K^+ de la solution du sol est celle des ions K^+ qui ne se désorbent qu'à des activités plus faibles. Par définition de l'équilibre, l'enthalpie libre partielle molaire des ions K^+ est la même dans la solution et sur l'adsorbant, pour une quantité adsorbée donnée. Lorsque l'on épuise le sol en diminuant l'activité des ions K^+ dans la solution, l'enthalpie libre molaire des ions K^+ diminue de la même façon sur l'adsorbant.

Ce travail qu'il faut fournir aux ions K^+ pour obtenir leur désorption sert à vaincre l'attraction de deux charges électriques de signes contraires. Pour une mole, il est tel que (106) :

$$\Delta\overline{G}' = \frac{Nee'}{\varepsilon d}$$

N : nombre d'avogadro ;
e : charge électrique le l'ion ;
e' : charge électrique de l'adsorbant ;
ε : constante diélectrique ;
d : distance des deux charges.

Plus $\Delta\overline{G}'$ est grand, plus la distance des ions à la particule est faible. Le calcul numérique de d connaissant $\Delta\overline{G}'$ ne présente pas une grande signification, car la constante diélectrique ε au contact de la particule est inconnue, et la charge électrique de l'adsorbant est mal définie. Toutefois, ces deux grandeurs sont sensiblement constantes ici, quelle que soit la quantité de potassium adsorbée, car les ions Ca^{++} sont très largement prédominants (2,7 p. 1 000 de Ca échangeable contre 0,06 à 0,35 p. 1 000 de K échangeable).

Or, la répartition des ions K^+ entre les divers niveaux d'énergie d'adsorption est en première approximation la même quel que soit le degré d'enrichissement du sol (graphique 22). On doit donc en conclure que les ions K^+ apportés par les engrais se sont distribués parmi les ions Ca^{++} à diverses distances des particules, selon le même mode que les ions K^+ préexistants, par une sorte de dilution. On note toutefois sur le graphique 22 un maximum des courbes vers $\Delta\overline{G}' = 500$ calories, c'est-à-dire vers les distances moyennes. Ce fait s'explique pour deux raisons :

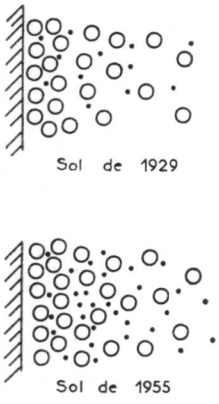
— lorsque la distance à la particule est grande ($\Delta\overline{G}'$ petit), la densité ionique est faible, conformément à la théorie des doubles couches ioniques (63, 64), et l'on rencontre peu d'ions K^+ ;

— près de la particule ($\Delta\overline{G}'$ grand), les ions Ca^{++} divalents sont retenus beaucoup plus énergiquement que les ions K^+, et ceux-ci y sont moins abondants.

On peut finalement schématiser la répartition des ions autour de la particule adsorbante, dans le sol pauvre de 1929 et dans le sol riche

de 1955 (graphique 23) : la courbe de répartition des ions K^+ en fonction de la distance à la particule est la même, avec un maximum aux distances moyennes, mais ils sont plus denses dans le sol de 1955.

Il existe une sorte de contradiction apparente entre les graphiques 19 d'une part, et 21 ou 22 d'autre part : les énergies d'adsorption sont sensiblement les mêmes dans tous les sols, et pourtant les activités à l'équilibre sont beaucoup plus élevées dans les sols riches. Le facteur de densité ionique intervient précisément ici : les quantités de potassium libérées avec un $\Delta\overline{G}'$ donné sont plus grandes dans les sols riches, et entretiennent des concentrations plus élevées.



GRAPHIQUE 23. — Schéma de la répartition des ions K^+ autour de la particule adsorbante, dans les sols de 1929 et 1955.

Il faut considérer de près ici la définition de l'activité. Des auteurs proposent de définir deux activités différentes (72) :

1° L'« escaping tendancy » de Lewis, à partir des enthalpies libres partielles molaires $\overline{G}$:

$$\overline{G} - \overline{G}_o = RT \ln a$$

2° L'activité « chimique », définie d'après le potentiel chimique μ :

$$\mu - \mu_0 = RT \ln a'$$

Dans des solutions, ces deux activités a et a' sont égales ($\overline{G} = \mu$).

D'après divers auteurs (56, 69, 72), lorsque l'on considère des équilibres d'adsorption, c'est-à-dire des systèmes présentant une phase adsorbante chargée électriquement, et une phase solution, l'équilibre n'est plus caractérisé par l'égalité des potentiels chimiques μ, mais par l'éga-

lité des potentiels *électrochimiques* $\overline{\mu}$. Ceux-ci s'identifient avec l'enthalpie libre partielle molaire $\overline{G}$:
dans la phase adsorbante :

$$\overline{G}_a = \overline{\mu}_a = \mu_a - Z\mathcal{F}\psi$$

dans la phase solution :

$$\overline{G}_s = \mu_s$$

A l'équilibre :

$$\overline{G}_a = \overline{G}_s = \overline{\mu}_a = \mu_s$$

mais

$$\mu_a \neq \mu_s$$

Z : valence de l'ion.
$\mathcal{F}$: Faraday.
ψ : potentiel électrique dû à la particule chargée.

En raison de l'intervention du terme ($ZF\psi$), les activités « chimiques » a' ne sont pas égales dans l'adsorbant et dans la solution. Les « escaping tendancy » sont au contraire égales, puisqu'il y a équilibre.

Le potentiel chimique μ est proportionnel au nombre d'ions par unité de volume, c'est une concentration. Il augmente ici en même temps que les apports d'engrais.

Dans les divers sols, le potentiel ψ est sensiblement constant, car le nombre d'ions K^+ est assez faible sur l'adsorbant par rapport au nombre d'ions Ca^{++}. Ainsi, au fur et à mesure de l'enrichissement, la densité d'ions K^+ et le potentiel chimique μ augmentent sur l'adsorbant, ce qui augmente également l'enthalpie libre partielle molaire $\overline{G}$, et l'activité des ions K^+ dans les solutions en équilibre. Cela explique que l'on trouve dans les sols riches des activités plus grandes, quoique les énergies d'adsorption soient les mêmes que dans les sols pauvres (les activités en solution sont seules envisagées ici dans l'interprétation des résultats ; elles peuvent donc être définies indifféremment d'après $\overline{G}$ ou d'après μ. La définition d'après $\overline{G}$ est toutefois plus logique et plus générale).

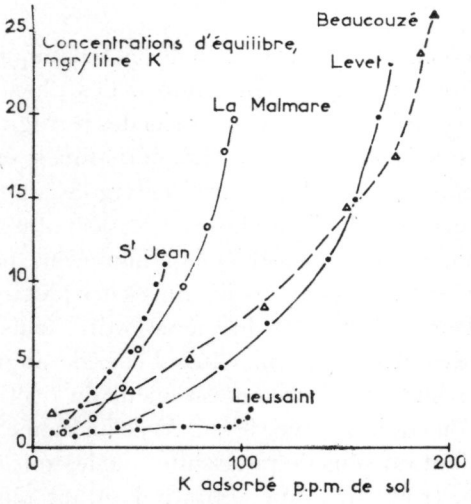
4° Variations saisonnières des concentrations d'équilibre et du travail de désorption.

La concentration en potassium de la solution du sol dépend à la fois de la quantité d'ions K^+ fixés sur le complexe colloidal, et de la force ionique de la solution. Celle-ci varie au cours de l'année selon l'intensité de l'activité microbienne (et naturellement selon le régime hydrique). Il en résulte une variation annuelle importante de la concentration en K des solutions du sol. Ainsi, pour un même rapport sol/solution, et dans un même sol, nous avons relevé des variations de 70 p. 100 dans ces con-

centrations ; elles présentent un maximum durant l'été. Le travail de désorption se révèle par contre plus constant. Pour caractériser par des données énergétiques les réserves potassiques d'un sol, il est donc préférable de s'attacher aux énergies d'adsorption, plutôt qu'aux activités d'équilibre.

5° Influence de la nature de l'argile des sols sur la dynamique du potassium.

Ce problème a été étudié sur les sols des champs d'essais de la Société Commerciale des Potasses d'Alsace, qui sont très divers quant à la nature



GRAPHIQUE 24. — Désorption du potassium, parcelles K_2 de divers champs d'essais.

de leurs argiles (93). Dans l'ensemble, l'influence de la nature de l'argile sur la dynamique du potassium n'apparaît pas fondamentale, car les sols renferment généralement des mélanges d'argiles, et d'autre part une fraction très importante de la capacité d'échange des terres est dûe aux colloides humiques. Il en résulte un comportement assez voisin de sols dont les argiles sont pourtant très différentes. Il faut excepter cependant le cas des terres contenant de fortes proportions d'illites en voie d'ouverture : ces terres sont susceptibles de fixer ou de libérer des quantités importantes d'ions K^+, sans variation appréciable de la concentration des solutions du sol. Dans les autres cas, on observe des courbes d'adsorption comparables à celle du sol de Versailles (graphique 24, se rapportant à divers sols ; celui de Lieusaint renferme une forte proportion d'illite en voie d'ouverture). Les activités à l'équilibre varient plus ou moins rapidement en fonction des apports d'engrais selon la capacité d'échange du

sol et son degré de saturation, mais on n'observe pas d'écarts considérables. Les colloides humiques atténuent très fortement les différences dues à la nature des argiles.

6° Conclusions.

Ces essais montrent que l'on retrouve dans les sols les phénomènes essentiels qui avaient été mis en évidence dans l'étude de l'adsorption du potassium par des argiles pures, notamment par la kaolinite :

— équilibres d'adsorption et de désorption ;

— chaleurs d'adsorption comparables, variant peu avec le degré de saturation en K ;

— concentrations d'équilibre et travail de désorption également comparables.

Il est donc possible d'étendre aux sols les techniques et les procédés d'interprétation appliqués aux argiles pures. Les phénomènes sont toutefois un peu plus complexes, on rencontre ici des rétrogradations intenses, et des variations saisonnières des caractéristiques énergétiques. Par contre, les différences dûes à la nature des argiles sont atténuées.

Au fur et à mesure de l'enrichissement, le potassium apporté par les engrais se dilue de façon sensiblement homogène parmi les ions K^+ préexistants dans le sol, à différentes distances des particules adsorbantes. Ces énergies d'adsorption restent du même ordre, mais les quantités de potassium adsorbées aux divers niveaux d'énergie augmentent considérablement. Il en résulte un fort accroissement de l'activité des ions K^+ dans les solutions en équilibre avec le sol. Avec un même apport d'énergie, on extrait ainsi d'autant plus de potassium que les sols ont été plus enrichis, et ces ions se trouvent à une activité d'autant plus grande dans la solution du sol. La nutrition potassique de la plante ne peut donc qu'en être facilitée.

B. — PHOSPHORE

Le plan de travail adopté pour l'étude de l'énergie d'adsorption des ions phosphoriques dans le sol est sensiblement le même que pour l'étude similaire du potassium : un sol progressivement enrichi a d'abord été examiné en détail, puis des essais ont été effectués sur d'autres sols de composition différente.

I. — ÉTUDES SUR UN SOL PROGRESSIVEMENT ENRICHI

Ce sol appartient à la même expérience d'enrichissement progressif. Il était initialement assez pauvre en phosphore assimilable par les plantes, d'après les divers tests chimiques qui lui ont été appliqués (0,045 p. 1 000 de P assimilable d'après la méthode Dyer). Des cultures effectuées dans

ce sol sans apports d'engrais phosphatés donnent des rendements médiocres ; et ceux-ci augmentent lorsque l'on introduit des phosphates.

Les parcelles qui ont servi à ces essais ont reçu depuis 1929 des épandages annuels de scories de déphosphoration, à raison de 70 kg environ de phosphore par hectare et par an. Ce sont maintenant des sols très riches en cet élément, bien que des phénomènes d'insolubilisation semblent s'être produits. Le bilan ne peut être qu'approximatif, car on ne peut actuellement doser de façon très précise l'ensemble des ions PO_4 adsorbés dans un sol. La meilleure méthode est la dilution isotopique, mais elle n'est pas très sûre malgré tout car l'équilibre de distribution isotopique ne s'établit qu'en plusieurs jours, souvent même en plusieurs semaines ou mois. Or, durant ce délai, la matière organique du sol évolue de façon à peu près certaine, libérant des ions PO_4.

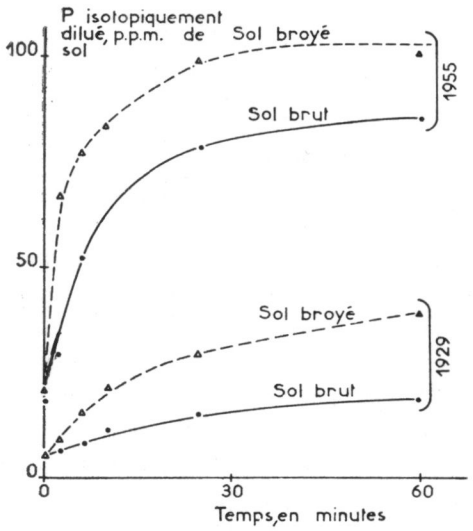
1° Techniques expérimentales.

a) **Épuisement des sols.** — De même que pour le potassium, les essais ont porté sur les prélèvements de 1929, 1932, 1936, 1943 et 1955. Nous avons tout d'abord tenté d'épuiser progressivement ces terres à l'aide d'une solution identique à celle du sol, préparée à partir d'acétates de calcium, magnésium et potassium. Dans les limites de concentrations permettant le dosage chimique, on n'extrait ainsi qu'une très faible fraction du phosphore du sol. Les dosages par radioactivité d'après la détermination préalable du rapport $^{31}P/^{32}P$ ne sont pas suffisamment sûrs ici : le rapport $^{31}P/^{32}P$ n'est pas assez bien défini, en raison de la libération de phosphore organique. Aussi, nous avons préféré extraire le phosphore à l'aide d'une solution un peu plus concentrée que celle du sol, qui désorbe plus énergiquement les ions PO_4, et opérer uniquement par voie chimique. Une solution 0,1 N d'acétate de sodium a été employée ; sa force ionique est de 0,1, alors que celle de la solution du sol est voisine de 0,03.

L'influence de la température sur les équilibres est très complexe, car plusieurs adsorbants sont en présence. Lorsque l'on élève la température, la concentration en P de la solution augmente (désorption), atteint un maximum au bout d'une heure environ, puis elle diminue lentement (réadsorption). D'après ce que l'on sait de la dynamique du phosphore dans le sol (2,38), cette réadsorption semble bien s'effectuer sur les hydroxydes ferriques. Elle est probablement dûe surtout à la répartition non homogène des ions PO_4 dans le sol. Les chaleurs d'adsorption ont été calculées d'après les concentrations maxima observées en fonction du temps. Elles ne sont donc pas déterminées d'une façon rigoureuse, nous les indiquons seulement à titre d'ordres de grandeurs. Ces ordres de grandeurs ont toutefois pu être vérifiés sur un autre sol très riche en matière organique ; celle-ci masque les hydroxydes métalliques, et l'on n'observe pas de réadsorption dans le temps (sol de l'Ecole Nationale d'Horticulture).

Les essais ont été finalement conduits ainsi : les sols ont été placés au contact des solutions d'acétate de sodium selon des rapports sol/solution variant de 1/1 à 1/1 000. Ces suspensions étaient ensuite agitées au thermostat et filtrées à des temps variables : 10, 30 minutes, 1, 3, 8, 24 heures..., de façon à établir une courbe de variation des concentrations en fonction du temps. On admettait pour concentrations d'équilibre les concentrations maxima. Dans l'interprétation énergétique, l'erreur commise ainsi est peu importante pour le calcul du travail de désorption, où a_x n'intervient que dans le logarithme du rapport a_i/a_x :

$$\overline{\Delta G'} = RT \ln \frac{a_i}{a_x}$$



GRAPHIQUE 25. — Influence du broyage du sol sur la vitesse de dilution isotopique.

Cette erreur peut être beaucoup plus élevée dans la détermination des chaleurs d'adsorption, effectuée d'après le rapport de deux valeurs de a_x :

$$\Delta \bar{L} = \frac{-RT^2}{T_2 - T_1} \ln \frac{a_{x2}}{a_{x1}}$$

b) **Mesure des vitesses de dilution isotopique.** — Ces mesures ont été faites sensiblement comme dans le cas des argiles. Le sol est d'abord finement broyé au mortier (agrégats de diamètre inférieur à 0,2 mm), de façon que les surfaces adsorbantes soient le plus possible en contact avec la solution. Cette influence du broyage sur la vitesse de dilution isotopique est très marquée, surtout en sol pauvre (graphique 25). Puis la terre est mise en suspension dans la solution d'acétate de sodium 0,1 N ; nous avons utilisé surtout le rapport sol/solution = 1/4. La suspension est ensuite agitée à température constante jusqu'à l'obten-

tion de l'équilibre, soit généralement pendant 24 heures. Elle est ensuite placée sur l'agitateur électromagnétique (graphique 7), et l'on ajoute à un instant donné la solution radioactive. La quantité de ^{32}P introduite est d'environ 30μc pour 25 grammes de sol et 100 cm³ de solution. Au bout de temps déterminés, par exemple 2, 5, 10, 30, 60 minutes..., une fraction de la suspension est filtrée rapidement sous vide. Les dosages sont effectués comme précédemment : P en solution par coeruléo-molybdimétrie, et radioactivité en solution par précipitation en phosphomolybdate d'ammonium, à l'aide d'entraîneur. A chacun des temps, on applique la relation :

$$\frac{\text{Pisotopiquement dilué}}{\text{P en solution}} = \frac{\text{Radioactivité introduite}}{\text{Radioactivité en solution}}$$

La vitesse de la solution isotopique est indépendante de la quantité de ^{32}P introduite : des essais ont été réalisés en ajoutant 4, 8, 40 et 80 μc ^{32}P ; les vitesses sont les mêmes dans tous les cas :

Temps	P isotopiquement dilué, en p. p. m. de sol, pour divers apports de ^{32}P				
	4 μ c	8 μ c	40 μ c	80 μ c	Moyenne
2 minut.	58	59	59	60	59
5 minut.	64	69	66	70	68
10 minut.	79	79	75	73	76
25 minut.	88	91	86	86	88
60 minut.	98	102	99	100	100

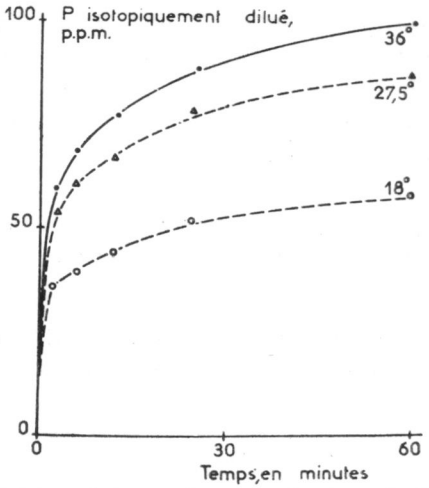
Par contre, les vitesses augmentent considérablement avec la température, qui doit être rigoureusement contrôlée (graphique 26). La cinétique de la dilution isotopique est toutefois trop complexe pour que l'on puisse en déduire directement les énergies d'activation.

c) **Phosphore isotopiquement diluable total.** — Ce dosage a été effectué malgré l'incertitude qu'il comporte quant à l'évolution possible de la matière organique. Nous avons toutefois ajouté aux suspensions un peu de toluène, pour éviter au moins des proliférations microbiennes intenses. Les suspensions contenant 50 g de sol et 100 cc de solution ont été additionnées de 100 μc ^{32}P et 0,5 cc de toluène, puis agitées de façon intermittente pendant huit jours. L'équilibre de distribution isotopique paraîssait alors atteint. Les quantités de P isotopiquement diluable total, participant aux équilibres sols-solutions, sont les suivantes :

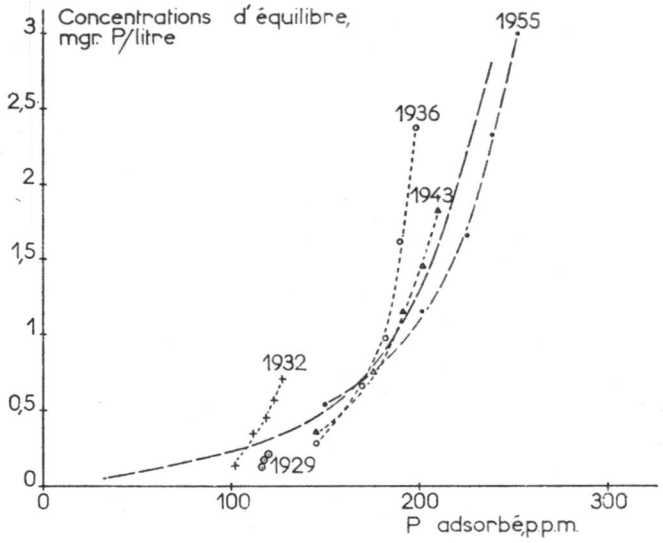
1929 : 120 p. p. m.
1932 : 128 p. p. m.
1936 : 203 p. p. m.
1943 : 214 p. p. m.
1955 : 258 p. p. m.

Le gain de P isotopiquement diluable entre 1929 et 1955 est de 138 p. p. m. Les apports d'engrais, durant cette même période, correspondent approxi-

mativement à 440 p. p. m. P (17 p. p. m. par an). On ne retrouve donc sous forme adsorbée que 30 p. 100 environ du P apporté par les engrais. L'augmentation la plus rapide de la teneur en phosphore isotopiquement



GRAPHIQUE 26. — Influence de la température sur la vitesse de dilution isotopique.



GRAPHIQUE 27. — Concentrations d'équilibre, en fonction des quantités de P restant adsorbées.

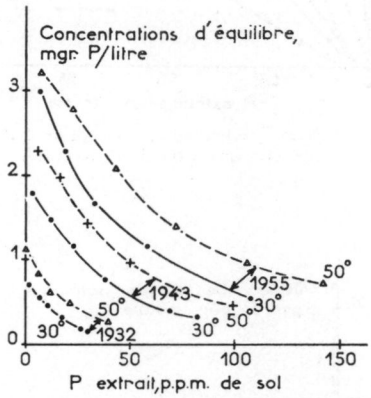
diluable se situe entre 1932 et 1936 ; c'est pendant cette même période que l'on observe le plus fort accroissement des concentrations d'équilibre. Les pertes par drainage étant très faibles, des précipitations importantes de phosphates se sont vraisemblablement produites depuis 1936.

2° Equilibres sols-solutions.

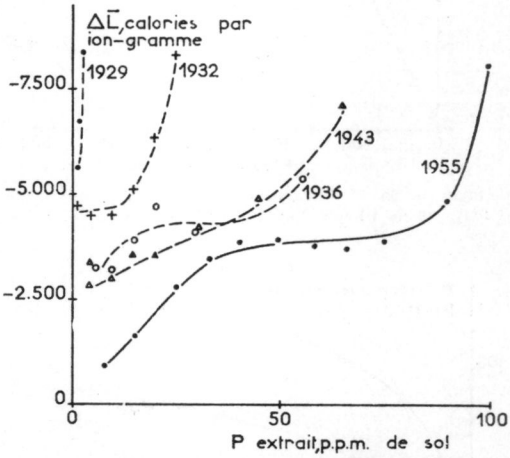
Connaissant les quantités de P extraites à chacun des rapports sol/solution, on peut, en les soustrayant du P total isotopiquement diluable, en déduire les quantités de P restant adsorbées :

P total — P extrait = P restant adsorbé.

Rappelons que ce calcul n'est qu'approché, en raison de l'indétermination qui pèse sur P total. Le graphique 27 représente les concentrations d'équilibre obtenues aux divers rapports sol/solution, en fonction de ces quantités de P restant adsorbées. Quoique nettement différenciées, les courbes relatives aux différents sols se groupent approximativement autour d'une courbe moyenne de désorption.



GRAPHIQUE 28. — Concentrations d'équilibre en fonction des quantités de P extraites, à 30° et 50°.

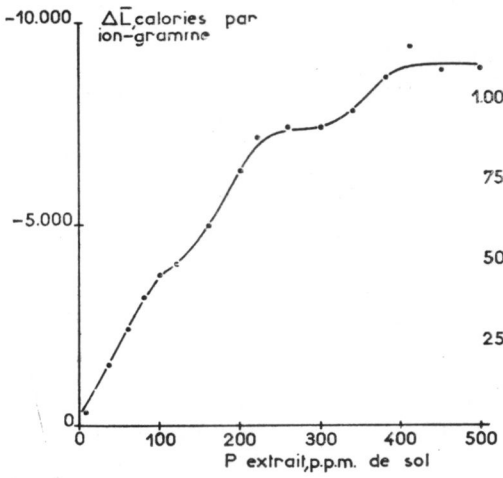


GRAPHIQUE 29. — Chaleurs d'adsorption des ions PO_4, en fonction des quantités extraites.

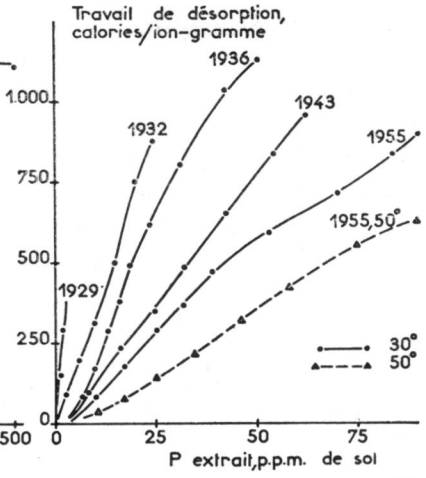
L'extraction du phosphore de ces sols s'effectue donc bien par désorption. Les concentrations d'équilibre sont, « grosso modo », fonction des quantités adsorbées. Il se superpose à ce mécanisme principal des phénomènes secondaires, que nous retrouverons dans l'étude de la dilution isotopique.

Sur le graphique 28, les concentrations d'équilibre obtenues à 30° et 50°C aux divers rapports sol/solution sont portées en fonction des quantités de P extraites. Elles augmentent avec la température, indiquant que la réaction d'adsorption est exothermique. Les valeurs correspondantes de $\Delta\bar{L}$ sont notées sur le graphique 29. On observe dans toutes ces courbes un palier bien caractérisé, vers $\Delta\bar{L} = 4\,000$ calories par ion-gramme. Ce palier est d'autant plus étendu que les apports d'engrais ont été plus importants, il semble correspondre à certaines liaisons d'adsorption bien définies. A titre de comparaison, les chaleurs d'adsorption déterminées

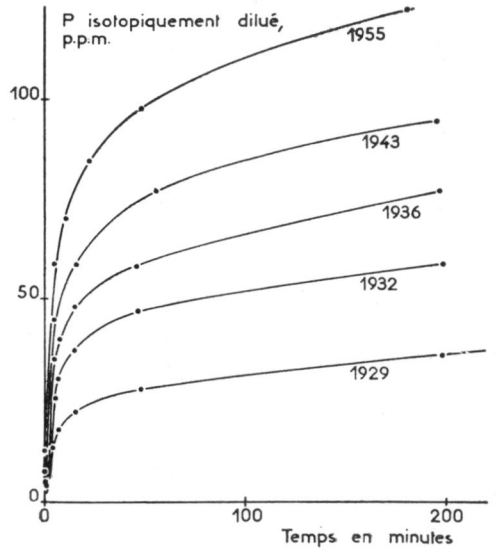
sur le sol de l'École Nationale d'Horticulture sont représentées sur le graphique 30. Ce sol est extrêmement riche en matière organique et en phosphore, et les équilibres sont mieux définis. La courbe présente également



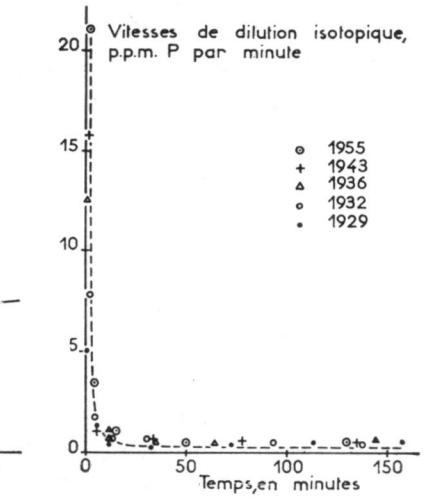
GRAPHIQUE 30. — Chaleur d'adsorption des ions PO_4, sol de l'École Nationale d'Horticulture.



GRAPHIQUE 31. — Travail de désorption $\Delta\bar{G}'$ en fonction des quantités de P extraites.



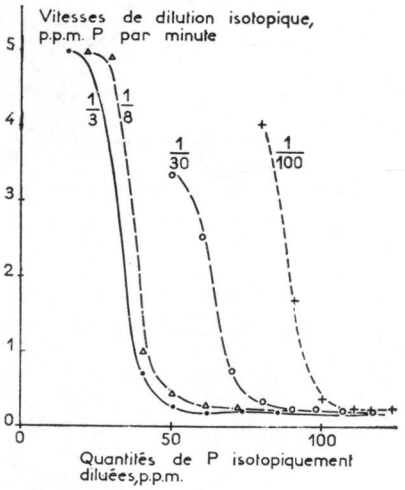
GRAPHIQUE 32. — Quantités de P isotopiquement diluées en fonction du temps.



GRAPHIQUE 33. — Vitesses de dilution isotopique en fonction du temps

des paliers très nets. Dans l'ensemble de ces sols, les chaleurs d'adsorption varient de 0 à 10 000 calories par ion-gramme. Elles sont du même ordre de grandeurs que celles qui ont été observées dans l'adsorption des ions PO_4 par la kaolinite.

Le travail de désorption $\Delta\overline{G'}$ a été déterminé aussi à partir de ces essais (graphique 31). Comme dans le cas du potassium, la quantité d'ions PO_4 extractible en fournissant un travail donné augmente considérablement au cours de l'enrichissement, ou, inversement, on doit fournir beaucoup moins de travail pour extraire une même quantité d'ions PO_4. Le travail de désorption diminue lorsque la température s'élève, il est plus faible à 50° qu'à 30°. La différence est particulièrement marquée dans les sols de 1943 et 1955. L'énergie d'adsorption diminue donc lorsque la température s'élève. D'après l'interprétation appliquée à l'étude des ions K^+, cela signifie que les distances des ions aux particules de sol augmentent,



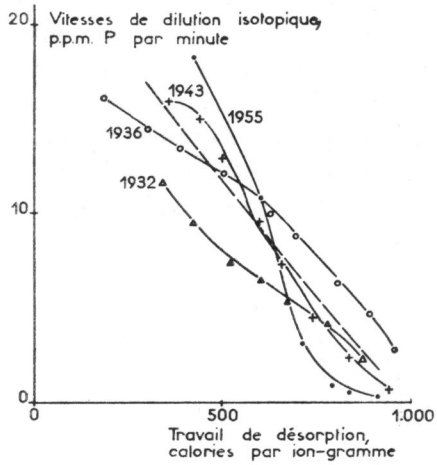
GRAPHIQUE 34. — Vitesses de dilution isotopique, en fonction des quantités de P isotopiquement diluées, à divers rapports sol/solution.

c'est-à-dire que l'atmosphère ionique qui entoure les particules se dilate. Ce fait est bien en accord avec les données relatives à l'agitation thermique des ions.

3° Vitesses de dilution isotopique.

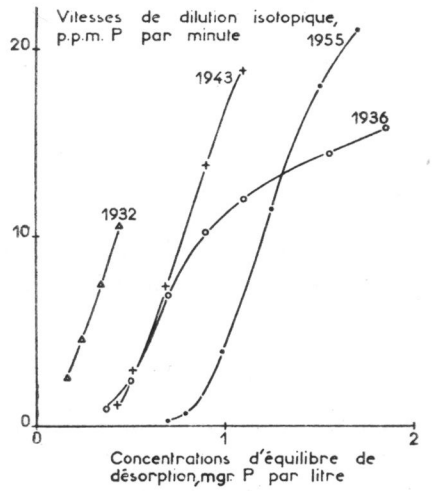
Le graphique 32 représente en fonction du temps les quantités de phosphore isotopiquement diluées dans les divers sols. Comme dans les études similaires sur argiles, on observe nettement deux phases : une première phase de dilution très rapide, et une seconde beaucoup plus lente. Ce fait est plus net encore lorsque l'on porte les vitesses de dilution isotopique en fonction du temps (graphique 33) : la première phase dure environ quinze minutes, de même qu'avec les argiles, puis la dilution se poursuit pendant plusieurs jours. L'interprétation reste la même : les cations échangeables du sol se diluent isotopiquement en un temps très

court, de l'ordre de quelques minutes (2, 49) ; on peut donc penser que les ions PO_4 qui se diluent dans le même temps leur sont liés dans la double couche ionique qui entoure les particules du sol. Les ions PO_4 qui se di-



GRAPHIQUE 35. — Vitesses de dilution isotopique en fonction du travail de désorption.

luent pendant la seconde phase lente seraient au contraire adsorbés sur des positions fixes : hydroxydes métalliques, réseau cristallin des argiles.



GRAPHIQUE 36. — Vitesses de dilution isotopique, en fonction des activités de désorption.

La vitesse de dilution isotopique d'une quantité donnée d'ions PO_4 n'est définie que pour un rapport sol/solution donné, de même que pour les argiles. Le graphique 34 représente les vitesses de dilution en fonction des quantités de P diluées, dans quatre suspensions d'un même sol, à des rapports sol/solution différents. Les ions PO_4 se diluent d'autant plus

rapidement que la suspension est plus diluée, et la concentration d'équilibre plus faible. On retrouve ici l'influence du travail de désorption, de façon plus nette encore que dans le cas des argiles.

Le graphique 35 indique également cette relation. Les vitesses de dilution isotopique mesurées dans chacun des sols à un même rapport sol/solution sont portées en fonction du travail nécessaire à la désorption, d'après les conventions adoptées dans l'étude des argiles. Les points relatifs aux divers sols et aux différentes quantités de P isotopiquement diluées ou désorbées se fondent assez bien en une relation générale. La vitesse de dilution isotopique semble donc surtout limitée par la différence entre l'activité a_i des ions PO_4 dans la solution initiale et l'activité a_x à laquelle se désorberaient les ions fixés. Une vitesse de dilution isotopique élevée indique un travail de désorption faible, c'est-à-dire une activité de désorption voisine de l'activité initiale. Cette relation permet, par le simple examen des vitesses de dilution isotopique, de prévoir approximativement la variation de l'activité au fur et à mesure de l'épuisement du sol, sans étudier systématiquement les équilibres sol-solution et la courbe de désorption. Il faut néanmoins connaître l'activité initiale a_i, dont ne dépend pas la vitesse de dilution isotopique. Ce dernier point, déjà établi en considérant l'influence du rapport sol/solution, est confirmé par l'examen de l'ensemble des sols (graphique 36) : la vitesse de dilution isotopique ne dépend pas de la valeur absolue des activités auxquelles les ions PO_4 sont susceptibles de se désorber. Pour un même sol, à un rapport sol/solution donné, la vitesse diminue en même temps que l'activité de désorption, mais aucune relation générale ne se dégage de l'ensemble des sols.

II. — INFLUENCE DE LA COMPOSITION DU SOL

Afin d'examiner dans quelle mesure les résultats obtenus sur le sol de limon de Versailles sont généralisables, des essais ont été effectués sur d'autres types de sols, de compositions très diverses. Ils proviennent de Stations Agronomiques Régionales ; le niveau de leurs réserves phosphoriques est connu d'après l'expérience culturale.

Les résultats numériques obtenus dans ces études seront donnés dans un prochain mémoire, à l'occasion de la comparaison entre les données physico-chimiques et l'alimentation des plantes. Nous nous bornons à en résumer ici les conclusions essentielles.

Les équilibres d'adsorption se manifestent très différemment selon la nature des colloïdes adsorbants du sol, et leurs proportions relatives. On rencontre dans les sols granitiques, les sols de limon et les sols tropicaux peu évolués des concentrations d'équilibre assez élevées, correspondant parfois à de faibles quantités de P adsorbées. Par contre les

concentrations d'équilibre sont faibles dans les sols calcaires, et surtout dans les sols tropicaux riches en hydroxydes métalliques, bien qu'il existe des quantités souvent importantes d'ions PO_4 isotopiquement diluables en temps court, c'est-à-dire très mobiles. La forte teneur de ces terres en colloïdes adsorbants ne permet qu'une faible activité des ions PO_4 dans les solutions du sol.

La cinétique de la dilution isotopique reste cependant assez comparable dans ces divers sols : une part importante des ions PO_4 adsorbés se dilue isotopiquement en un temps court, de même que dans les argiles calciques enrichies en phosphore. La dilution isotopique des autres fractions reste au contraire très lente.

Plus encore que dans le cas du potassium, l'examen de ces différents sols fait apparaître des différences considérables entre les concentrations de leurs solutions, qui varient ici dans le rapport de 1 à 100.

Conclusions.

Malgré diverses difficultés et incertitudes relatives aux dosages, on retrouve dans l'adsorption des ions PO_4 par les sols toutes les propriétés essentielles des argiles pures. Dans l'ensemble, les équilibres sols-solutions suivent une loi d'adsorption. L'intensité de cette adsorption varie selon les types de sols, c'est-à-dire selon leur teneur en colloïdes adsorbants et la nature de ceux-ci. La cinétique de la dilution isotopique indique deux modes d'adsorption distincts ; l'un peut être attribué aux cations des doubles couches ioniques, l'autre aux hydroxydes métalliques et à la surface des cristaux. Ces deux mécanismes sont en équilibre entre eux et avec la phase liquide.

La vitesse de la dilution isotopique n'est définie que pour un rapport sol/solution donné. Elle est surtout fonction du travail de désorption. Celui-ci reflète bien la richesse phosphorique des sols ; la quantité d'ions PO_4 extractibles en fournissant un même travail augmente considérablement avec les apports d'engrais.

La considération de la vitesse de dilution isotopique permet de prévoir approximativement comment variera l'activité des ions PO_4 au fur et à mesure de l'épuisement du sol, sans qu'il soit nécessaire d'établir la courbe de désorption. L'étude des équilibres sols-solutions est extrêmement longue et délicate. Au contraire, la mesure des vitesses de dilution isotopique est relativement rapide, et ne présente pas de grandes difficultés techniques. En fait, elle est seule applicable si l'on veut examiner avec quelque extension les réserves phosphoriques des sols, par une méthode non conventionnelle.

RÉSUMÉ

On retrouve dans l'étude de l'énergie d'adsorption des ions minéraux par les sols les phénomènes essentiels rencontrés dans l'étude similaire de l'adsorption par les argiles pures. Les énergies d'adsorption sont du même ordre. La chaleur d'adsorption des ions K^+ reste négative, faible, et ne présente pas de variation importante selon la quantité de K adsorbée. La concentration en potassium des solutions du sol varie largement au cours de l'année, selon la force ionique de ces solutions ; celle-ci dépend de l'intensité de l'activité microbienne. Le travail de désorption reste plus constant, et représente un meilleur critère pour caractériser, par des données énergétiques, les réserves potassiques du sol. Les valeurs absolues de ce travail sont du même ordre que pour les argiles pures.

L'enrichissement du sol en K échangeable par les engrais potassiques s'effectue globalement par adsorption ; on observe un équilibre bien défini entre toute quantité de potassium adsorbée échangeable et les solutions en contact avec le sol, si leur force ionique est constante. Ces équilibres sont très rapidement atteints.

Les ions K^+ apportés par les engrais se sont en quelque sorte dilués dans les ions préexistants, de telle sorte que le travail de désorption correspondant à l'épuisement du sol reste du même ordre. Mais la quantité d'ions K^+ libérés lorsque l'on fournit un travail donné est d'autant plus grande que le sol a été plus enrichi.

Le potassium échangeable de la plupart des sols étudiés obéit à des équilibres de désorption, sauf dans les cas de fortes teneurs en illites en voie d'ouverture, qui constituent de véritables « tampons » potassiques.

La dynamique des ions PO_4 adsorbés par le sol est comparable à celle qui a été observée chez les argiles : chaleur d'adsorption, travail de désorption, cinétique de la dilution isotopique. La vitesse de la dilution isotopique ne dépend guère de l'activité des ions PO_4, elle est surtout en relation avec le travail de désorption. Elle indique ainsi approximativement comment variera au cours de l'équisement du sol la concentration en ions PO_4 de sa solution.

La répartition du phosphore entre les phases solide et liquide des sols dépend de leur pouvoir adsorbant, c'est-à-dire de leur teneur en colloïdes argileux et humiques, en calcaire, et surtout en hydroxydes métalliques. Les concentrations des solutions du sol sont élevées dans les sols sableux, plus faibles dans les sols riches en calcaire tendre, extrêmement faibles dans les sols qui contiennent beaucoup d'hydroxydes métalliques. La cinétique de la dilution isotopique reste assez comparable dans tous ces sols. L'étude des réserves phosphoriques des sols par la technique isotopique s'avère plus féconde — et plus commode — que leur étude purement chimique. La cinétique de la dilution isotopique fournit en effet une indication très importante : la mobilité des ions PO_4.

SUMMARY

The energy of adsorption of mineral ions by soil colloids, and the mineral nutrition of plants (Second part)

The study of adsorption of mineral ions by soils reveals the same essential phenomena which are encountered in the study of ion adsorption by pure clays. The energies of adsorption are of the same magnitude. The heat of adsorption of K^+ ions remains negative and slight, and does not show any marked variations according to the amounts of K adsorbed. The K concentration of soil solutions greatly varies during the season, according to the ionic force of the solution ; the latter depends on the intensity of microbial activity. The force of desorption is more constant and serves as a better criterion for characterizing the potassium reserves of the soil by energetic data. The absolute values of this force are of the same magnitude as in pure clays.

The enrichment of soil with exchangeable K occurs by adsorption ; there is a well defined equilibrium between the amounts of adsorbed exchangeable-K and the solutions in contact with the soil, if their ionic force is constant. These equilibria are very rapidly reached.

The K^+ ions supplied by fertilizers become diluted with the already present ions in a way that the force of desorption corresponding to the depletion of soil remains of the same magnitude. But the amount of K^+ ions liberated at a given force is the higher the greater the enrichment of the soil is.

Exchangeable potassium in the majority of soils investigated follows the equilibria of desorption, except at high levels of illite serving as true potassium buffers.

The dynamics of PO_4 ions adsorbed by the soil is similar to that observed in clays : heat of adsorption, force of desorption, cinetics of isotopic dilution. The rate of isotopic dilution does not depend of the activity of PO_4 ions, but is mainly related to the force of desorption ; its value more or less indicates the variations in the PO_4 concentration in the soil solution during the depletion of the soil.

The distribution between the solid and liquid phase of phosphorus in soil depends on the fixing capacity of the soil, that is on the levels of colloidal clay and humic matter, limestone and especially metallic hydroxides. The concentration of the soil solution is high in sandy soils, much weaker in soils rich in soft limestone, and very low in soils of high metallic-hydroxide content. The cinetics of isotopic dilution is rather similar in all these soils. The study of the phosphorus reserves in soil is more appropriate and much simpler by the isotopic technique than by chemical investigations. The cinetics of isotopic dilution supplies a very important indication of the mobility of PO_4 ions.

ZUSAMMENFASSUNG

Adsoptionsenergie der mineral Ionen auf den Bodenkolloïden und mineral Ernährung der Pflanzen (z. Teil).

Bei der Untersuchung der Adsorptionsenergie der mineral Ionen durch den Boden findet man wieder die Hauptvorgänge die bereits bei der ähnlichen Untersuchung mit reiner Tone gefunden wurden. Die Adsorptionsenergiewerte haben die selbe Grössenordnung. Die Adsorptionswärme der K-Ionen bleibt negativ, gering und verändert sich kaum mit der sorbierten K-Menge. Die K-Konzentration der Bodenlösungen ist sehr wechselnd im Laufe des Jahres und zwar ja nach der Ionenkraft dieser Lösungen und diese hängt von der mikrobiellen Tätigkeitsintensität ab. Die Desorptionsarbeit bleibt konstanter und stellt ein besseres Kriterium dar um, durch energetischen Daten, die K-Vorräte des Bodens zu charakterisieren. Die absoluten Werte dieser Arbeit haben dieselbe Grössenordnung wie bei reinen Tonen.

Die Anreicherung des Bodens an austauschbares Kalium durch Kalidünger erfolgt durch Sorption ; man beobachtet ein wohlbestimmtes Gleichgewicht zwischen jede sorbierte austauschbare K-Menge und den mit dem Boden in Kontakt stehenden Lösungen, wenn ihre Ionenkraft konstant ist. Diese Gleichgewichte werden sehr schnell erreicht.

Die durch den Dünger gebrachten K-Ionen werden sozusagen in den vorhandenen Ionen verdünnt, sodass, die Desorptionsarbeit die der Verarmung des Bodens entspricht die selbe Grössenordnung behält. Aber die freigesetzte K-Ionenmenge ist um so grösser je mehr der Boden angereichert wurde, wenn man eine bestimmte Arbeit leistet.

Das austauschbare K in den meisten untersuchten Böden folgt diesen Desorptionsgleichgewichten mit Ausnahme hoher Gehalte in sich öffneten Illiten, die wirkliche Kali « Puffer » bilden.

Die Dynamik der durch den Boden sorbierten PO_4-Ionen ist mit der mit Tonen beobachteten vergleichbar : Sorptionswärme, Desorptionsarbeit, Kinetik der isotopischen Verdünnung. Die Geschwindigkeit der isotopischen Verdünnung hängt nicht von der Aktivität der PO_4-Ionen ab ; sie ist vor allem von der Desorptionsarbeit abhängig. Mit einer gewissen Annäherung gibt sie so an wie die PO_4-Ionenkonzentiation der Lösung sich während der Verarmerung des Bodens verändern wird.

Die Verteilung des Phosphors zwischen fester-und flüssiger Phase der Böden hängt vor der Sorptionsfähigkeit, d. h. von dem Gehalt an Tonkolloïden und Humuskolloïden, an Kalk und besonders an Metalhydroxyden. Die Konzentration der Bodenlösungen sind gross bei sandigen Böden, geringer bei Böden die reich an leicht löslichen Kalk sind, äusserst gering bei metalhydroxydenreichen Böden. Die Kinetik der Isotopenverdünnung bleibt ungefähr die selbe in allen Böden. Die Untersuchung der Phosphorsäurevorräte der Böden mit der Isotopentechnik ist erfolgreicher und einfacher als die reine chemische Untersuchung. In der Tat liefert die Kinetik der Isotopenverdünnung ein sehr wichtiger Befund : die Beweglichkeit der PO_4-Ionen.

Энергия адсорбции минеральных ионов коллоидами почвы и минеральное питание растений.

Р. БЛЯНШЕ. Версаль (Вторая часть).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

При изучении энергии адсорбции минеральных ионов почвами, снова находятся основные явления, уже встреченные в похожем изыскании, касающемся адсорбции чистыми глинами. Энергии адсорбции — такого же порядка. Теплота адсорбции ионов K^+ остается отрицательной, слабой, и не изменяется сколько-нибудь значительно в зависимости от поглощенного количества калия. Концентрация калия почвенных растворов изменяется в широких пределах в течение года, согласно ионной силе (force ionique) этих растворов; эта сила зависит от интенсивности микробиологической деятельности. Работа десорбции более постоянна, и представляет наилучший критерий, чтобы охарактеризовать, по энергетическим данным, калийные запасы почвы. Абсолютные величины этой работы (десорбции) — такого же порядка, как для чистых глин.

Обогащение почвы обменным калием калийными удобрениями делается вообще адсорбцией; наблюдается хорошо определенное равновесие между всяким количеством адсорбированного калия и растворами соприкасающимися с почвой, если их ионная сила постоянна. Эти равновесия достигаются очень быстро.

Ионы K^+, внесенные удобрениями, разбавились некоторым образом в преждесуществовавших ионах, так что работа десорбции, соответствующая истощению почвы, остается того же порядка. Но количество ионов K^+ освобождающихся, когда прилагается данная работа, тем более велико, чем почва была сильнее обогащена.

Обменный калий большинства изученных почв повинуется равновесиям десорцбции, кроме случаев с большими количествами иллитов собирающихся открыться, которые представляют настоящие калийные. «тампоны».

Динамика ионов PO_4, адсорбированных почвой, сравнима с той, которая была замечена у глин : теплота адсорбции, работа десорбции, кинетика изотопического разбавления. Скорость изотопическгого разбавления почти не зависит от активности ионов PO_4; она главным образом находится в зависимости от работы десорбции. Она указывает таким образом приблизительно, как будет изменяться, в течение истощения почвы, концентрация ионов PO_4.

Распределение фосфора между почвенными фазами твердой и жидкой зависит от их поглощающей способности, то-есть, от их содержания глинистых и гумусовых коллоидов, известняка и в особенности металлических гидроксидов. Концентрации почвенных растворов велики в песчаных почвах, слабее в почвах богатых мягким известняком, чрезвычайно слабы в почвах собержащих много металлических гидроксидов. Кинетика изотопического разбавления остается довольно похожей во всех почвах. Изучение почвенных запасов фосфорной кислоты изтопическим методом является более плодовитым — и более легким —, чем их изучение чисто химическим путем. В самом деле, кинетика изотопического разбавления дает очень важное указание : подвижность ионов PO_4.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(2) BARBIER (G.), LESAINT (M.), TYSZKIEWICZ (E.). — Recherches au moyen d'isotopes sur les phénomènes d'autodiffusion dans le sol et sur l'alimentation des plantes. *Ann. Agr.*, **6**, p. 923-959, 1954.

(33) CHAMINADE (R.). — Les formes du phosphore dans le sol. *Ann. Agr.*, **1**, p. 1-53, 1944.

(41) CHAMINADE (R.). — Le potassium et la matière organique, Potassium Symposium. Institut International de la Potasse, Berne, p. 203-214, 1955.

(44) DEMOLON (A.) et BARBIER (G.). — Contribution à l'étude de l'évolution des phosphates solubles dans les sols minéraux. *Ann. Agr.*, **3**, p. 329-363, 1930.

(47) NYE (P. H.) and FOSTER (W. N. M.). — Do plants vary in their ability to utilize less readily available soil phosphate? *C. R. VIe Congr. Int. Sc. Sol*, Paris, vol. D, p. 257-262, 1956.

(49) TENDLELI (C.), GRENIER DE RUERE (J.) et BARBIER (G.). — Échanges isotopiques du potassium peu mobile des sols. *C. R. Ac. Sc.*, **243**, p. 87-89, 1956.

(50) RUSSEL (R. S.), RUSSEL (E. W.), MARAIS (P. G.) et FOSTER (W. N. M.). — Facteurs influençant l'assimilabilité de l'acide phosphorique des sols par les plantes. *Util. En. Atom.*, **12**, p. 118-123, 1955.

(56) OVERSTREET (R.) and DEAN (L. A.). — The availability of Soil Anions in Mineral Nutrition of Plants. *Univ. Wisconsin Press*, p. 107-132, 1953.

(63) DARMOIS (E.). — Electrochimie, in Handbuch der Physik, Springer Verlag, Berlin, XX, p. 456-465, 1957.

(64) WIKLANDER (L.). — Cation and anion exchange phenomena, in Chemistry of the Soil. Reinhold Publis. Corp., New York, p. 107-148, 1955.

(69) HARNED (H. S.) and OWEN (B. B.). — The physical chemistry of electrolytic solutions. Reinhold Publis. Corp., New York, p. 314-316, 1950.

(72) OVERSTREET (R.) et BABCOCK (K. L.). — Sur la définition de l'activité. *Discussions VIe Cong. Int. Sc. Sol*, Paris, 1956.

(92) BARBIER (G.). — Influence des colloïdes humiques sur certaines propriétés physiques et chimiques des terres argileuses. *Ann. Agron.*, p. 765-780, 1935.

(93) FRANC DE FERRIÈRE (P. J. J.), CAMEZ (Th.) et MILLOT (G.). — Influence des types d'argile des sols et de la pluviosité sur la nutrition potassique de la pomme de terre. *Ann. Agro.*, **1**, p. 51-72, 1958.

(94) CHAMINADE (R.). — Nouvelles recherches sur les composés phospho-humiques. *Ann. Agro.*, **3**, p. 229-241, 1946.

(95) CHAMINADE (R.) et VISTELLE (R.). — Contribution à l'étude expérimentale du rôle de l'humus dans les sols. *Ann. Agro.*, **4**, p. 536-545, 1947.

(96) CHAMINADE (R.), SEGALEN (P.) et VISTELLE (R.). — Influence de l'humus sur l'évolution de l'acide phosphorique dans un sol latéritique. *Ann. Agro.*, **4**, p. 530-536, 1947.

(97) CHAMINADE (R.). — Contribution à l'étude de la fixation par le sol de l'anion phosphorique. *Ann. Agr.*, **2**, p. 171-184, 1952.

(98) GONZALEZ GARCIA (F.) and TRISTAN MATOS (F.). — Factors in the fixation of phosphorus in calcareous soils. *C. R. VIe Congr. Int. Sc. Sol*, Paris, vol. B., p. 609-617, 1956.

(99) MCDONNELL (P. M.) and WALSH (T.). — P values (Morgans Solutions) as an index of the phosphorus status of organic soils. *C. R. VIe Congr. Int. Sc. Sol.* Paris, vol. B., p. 787-796, 1956.

(100) FRIED (M.) and SHAPIRO (R. E.). — Phosphate supply pattern of various soils. *Soil Soc. of Am. Proceed*, **4**, p. 471-475, 1956.

(101) TALIBUDEEN (O.). — Discussions à la conférence internationale sur l'utilisation des radioisotopes. Paris, 1957 (en cours d'impression).
(102) BASTISSE (E.). — Contribution à la détermination du type minéralogique des argiles des sédiments, sols naturels en place et terres de culture. *Ann. Agro.*, **3**, p. 398-454, 1947.
(103) HAYLOCK (O. F.) — A method for estimating the availability of non exchangeable potassium. *C. R. VIe Congr. Int. Sc. Sol*, Paris, vol. B., p. 403-408 1956.
(104) GOUERE (A.). — Évolution des engrais potassiques dans le sol, son influence sur leur utilisation par les plantes. *Ann. Agr.*, p. 425-483, 1944.
(105) BLANCHET (R.) — Diverses formes d'adsorption du potassium échangeable dans le sol. *C. R. Ac. Sc.*, **244**, p. 3082-3085, 1957.
(106) HARNED (H. S.) and OWEN (B. B.). — The physical chemistry of electrolytic solutions. Reinhold Publ. Corp. New York, p. 19-22, 1950.

631.416.871.1 : 581.14 (44).

LE MANGANÈSE DANS LES SOLS DE BRETAGNE ET SES RELATIONS AVEC LA CROISSANCE DES VÉGÉTAUX

PAR

M. COPPENET (1)

Station d'Agronomie, Quimper.

PLAN DU MÉMOIRE

Introduction.

I. — Le manganèse dans le sol.

A. — Manganèse total :

1° Le manganèse dans la croûte terrestre. État naturel.
2° Le manganèse dans les roches. Méthode de dosage.
3° Le manganèse dans les sols de Bretagne.

B. — Manganèse actif :

1° Formes du manganèse dans le sol.
2° Manganèse extrait par l'eau.
3° Manganèse extrait par la solution d'un sel neutre.
4° Manganèse facilement réductible.
5° Transformation du sulfate manganeux enfoui dans le sol.
6° Action du pH du sol sur le manganèse facilement réductible.
7° Action du pH de la solution d'extraction.
8° Rôle de la matière organique.

C. — Évolution du manganèse au cours des phénomènes pédologiques.

(1) Avec la collaboration technique de Mme J. CALVEZ et le concours dévoué de tout le personnel de la Station d'Agronomie de Quimper.

II. — Relations entre le manganèse du sol et le manganèse absorbé par les plantes.

A. — Cas d'un sol plus ou moins enrichi en manganèse, le pH restant le même.

B. — Cas d'un sol acide plus ou moins neutralisé.

C. — Reproduction expérimentale du phénomène de carence en pots de végétation.

D. — Fixation des seuils de carence. Teneur en manganèse de quelques plantes fourragères.

E. — La toxicité de l'élément manganèse.

F. — Activité du manganèse contenu dans les scories de déphosphoration.

Résumé.

Références bibliographiques.

INTRODUCTION

Y. Coïc, en 1949, a mis en évidence de graves carences en manganèse dans le Finistère, puis étudié, particulièrement, leurs manifestations sur les céréales (1) ; un mémoire aux Annales de Physiologie végétale donne l'essentiel de ses travaux sur ce sujet (2).

La présente étude a comme objectif l'examen de l'élément manganèse des sols de Bretagne et de son incidence sur le développement des végétaux cultivés.

L'élément « Manganèse », nombre atomique 25, poids atomique 54,93, est classé dans le groupe VII du tableau périodique de MENDELEJEFF où il voisine avec la triade Fer, Cobalt, Nickel, ces quatre corps simples ayant des propriétés similaires. Beaucoup moins abondant que le fer dans la composition de l'écorce terrestre, il y joue, cependant, un rôle important ; son comportement dans les sols est assez voisin de celui du fer et son rôle n'est pas moindre dans le métabolisme végétal. Un nombre assez restreint de travaux de recherches a porté sur la dynamique des oxydes de manganèse présents au sein des sols et sur leurs rôles dans la pédogénèse, alors que d'innombrables études ont montré toute l'importance du manganèse en tant qu'oligo-élément. Dans le monde, des superficies non négligeables sont incapables de donner des récoltes normales, sans complément de sels de manganèse aux fertilisants habituels.

Nous apporterons, au cours de ce travail, quelques précisions sur la répartition du manganèse dans les profils de divers sols.

Nous n'ignorons pas l'importance que peut revêtir le manganèse, en tant qu'oligo-élément, dans le métabolisme animal et, en particulier, pour l'élevage des animaux domestiques. Les recherches concernant ce problème n'ont pu être abordées ici.

Un régime alimentaire carencé en manganèse peut, en effet, amener des troubles graves de l'ossification chez le poussin (pérose), une diminution de la production des œufs ainsi que de nombreux cas de mortalité embryonnaire chez les volailles. On considère qu'il faut, au minimum, 35 mg de Mn par kg d'aliment dans le régime des pondeuses pour éviter ces accidents.

D'autre part, J. COLEOU (3) cite les travaux de BENTLEY et PHILLIPS qui signalent qu'en-dessous d'une teneur en Mn de la ration de 10 mg par kg de matière sèche, la croissance des jeunes bovins risque d'être affectée, ces derniers auteurs considérant, en outre, comme plus favorable pour la croissance et pour de bonnes conditions de reproduction, un apport d'au moins 20 mg par kg de matière sèche de la ration.

En Bretagne, nous avons trouvé les teneurs suivantes pour des végétaux présentant des signes de carence en manganèse ou, tout au moins, ayant poussé sur des sols originellement acides, pauvres en manganèse, puis fortement chaulés :

Grain d'avoine ou de blé : 10 à 30 mg de Mn par kg de matière sèche ;
Pailles d'avoine ou de blé : 5 à 25 mg de Mn par kg de matière sèche ;
Céréales en herbe : 12 à 25 mg de Mn par kg de matière sèche ;
Ray-grass italien à l'épiaison : 10 à 40 mg de Mn par kg de matière sèche.
Trèfle incarnat à la floraison : 13 à 19 mg de Mn par kg de matière sèche ;

D'une façon générale, la teneur en manganèse de la matière sèche des feuilles vertes de plantes carencées en cet élément est inférieure à 25 mg par kg. Une attention particulière devra, semble-t-il, se porter sur les exploitations bretonnes où les terres ont reçu de fortes doses d'amendements calcaires mais notre intention, à ce propos, se limite simplement à fournir aux nutritionnistes quelques éléments de base sur la composition des récoltes destinées à l'alimentation animale. Dans la seconde partie du présent mémoire, au chapitre D, nous donnons la composition de quelques graminées et légumineuses de prairies artificielles récoltées à l'époque de la fenaison sur le territoire de dix communes du Sud-Finistère.

I. — LE MANGANÈSE DANS LE SOL

A. — MANGANÈSE TOTAL

1° Le manganèse dans la croûte terrestre - État naturel.

C'est, généralement, sous forme d'oxydes que l'on rencontre le manganèse dans la nature mais on le trouve encore sous forme de carbonate, sulfure, silicate et borate (4). Le bioxyde MnO_2 (pyrolusite) est, de beaucoup, le plus répandu à côté de l'hausmannite (Mn_3O_4 ou oxyde salin), de la braunite (Mn_2O_3 anhydre) et de l'acerdèse ou manganite (Mn_2O_3, H_2O).

D'après POLYNOV (5), le manganèse entre pour 0,1 p. 100 exprimé en élément simple, dans la composition de l'écorce terrestre, alors que les proportions seraient : 4,7 p. 100 pour Fe, 2,4 p. 100 pour K, 0,58 p. 100 pour Ti, 0,1 p. 100 pour P et 0,06 p. 100 pour S.

VERNADSKY (6) donne des chiffres du même ordre de grandeur et également 0,1 p. 100 en ce qui concerne Mn.

Nous avons dosé le manganèse contenu dans un certain nombre d'échantillons de roches, les résultats sont donnés au chapitre suivant.

2° Le manganèse dans les roches.

a) Méthode de dosage utilisée.

La colorimétrie de l'ion permanganique MnO_4^-, après oxydation par le périodate de sodium, constitue une très bonne et spécifique méthode. Les cations gênants sont seulement les cations colorés, l'action du fer est éliminée par la présence d'une proportion de 3 p. 100 d'acide phosphorique au moment de l'oxydation. Il convient d'éliminer le chlore et naturellement toutes les substances réductrices suceptibles d'être présentes.

Nous avons porté une attention spéciale à la reprise des cendres végétales et des résidus minéraux très riches en silice et silicates (7) ; on sait, en effet, que les acides minéraux forts ne font pas passer en solution la totalité du manganèse présent, notamment celui des silicates. Au lieu de faire une première reprise par NO_3H, par exemple, suivie d'une reprise fluorhydrique du résidu resté sur le filtre, nous préférons effectuer immédiatement une attaque par $HF + SO_4H_2$ en creuset de platine, ce qui nous donne pratiquement la totalité de l'élément. La sensibilité de cette méthode est telle, qu'elle permet de doser facilement Mn dans les sols ; pour les végétaux carencés et les pailles, il suffit de prendre une prise d'essai adéquate. La densité optique pour 1 γ de Mn dans 10 cm^3 est 0,005 environ, à 5 250 Å.

Dans le cas de microdosages nécessaires pour de très petits échantillons végétaux, il conviendrait d'adopter la méthode à la tétrabase (tétraméthyldiaminodiphénylméthane) ou T. M. D. D. M. (8). Cette seconde méthode est basée sur le principe suivant : oxydation catalytique de la tétrabase par le permanganate formé par action de l'acide périodique sur un sel de manganèse ; le produit de la réaction est d'abord bleu intense puis la coloration passe au vert et vire enfin au violet. On peut ainsi doser des quantités de Mn de l'ordre de 0,1 γ avec une précision de 10 à 15 p. 100. La première méthode, moins sensible, a par contre, une reproductibilité bien supérieure.

b) **Dosage dans les roches.**

Les échantillons ont été récoltés surtout dans le département du Finistère, mais certains l'ont été dans les Côtes-du-Nord et le Morbihan ; chacun d'eux provient d'une seule station et toutes les garanties furent prises afin qu'ils représentent bien le sous-sol de cette station.

Des fragments de quelques dizaines de grammes ont été broyés au mortier de fer, puis, au moment de l'analyse, 500 mg de substance sont broyés à nouveau très finement au mortier d'agate. L'attaque fluorhydrique est faite au bain de sable, après calcination, dans de petits creusets en platine, avec 2 à 3 cm³ d'acide fluorhydrique Dé = 1,14, plus 10 gouttes d'acide sulfurique Dé 1,84. On chauffe d'abord très lentement, puis plus fort (durée totale 3 à 4 heures environ), pour chasser les dernières traces d'acide fluorhydrique. On reprend par 2,5 cc d'acide sulfurique et 25 cc d'eau bouillante, environ, en plusieurs fois ; après filtration, il est nécessaire de faire une nouvelle attaque fluorhydrique sur le résidu resté sur le filtre. La seconde reprise sera ajoutée au premier filtrat, de manière à ne pas dépasser 50 cc de volume total. La détermination colorimétrique du manganèse se fait alors par oxydation périodique, dans les conditions que nous venons de voir.

Les tableaux suivants (tableau I) donnent les résultats obtenus par catégorie de roches pour 121 échantillons.

Si nous classons, par ordre de teneur croissante, les différentes catégories de roches analysées, nous obtenons :

Nature de la roche	Nombre d'échantillons analysés	Teneur en p.p.m. de Mn	
		Moyenne	Chiffres extrêmes
Grès	4	68	44 et 112
Granulites	35	115	35 et 349
Granites	26	231	46 et 734
Gneiss et micaschistes	16	307	50 et 620
Schistes micacés	12	490	132 et 1611
Schistes primaires	21	561	111 et 1865
Amphibolites	4	1132	990 et 1485

Tableau I

Manganèse contenu dans les roches, exprimé en p. p. m. de Mn.

GRANITES

Localité	Mn
Huelgoat 1 (Fre)	119 p. p. m.
» 2	145 p. p. m.
» 3	152 p. p. m.
Kerfeunteun	250 p. p. m.
Ploudaniel	55 p. p. m.
Ile Longue	242 p. p. m.
Pont Aven 1	246 p. p. m.
» 2	57 p. p. m.
Rosporden	116 p. p. m.
Plounéour-Ménez	273 p. p. m.
Trégunc	370 p. p. m.
Glomel 1 (C. du N.)	227 p. p. m.
» 2	325 p. p. m.
» 3	112 p. p. m.
Callac	207 p. p. m.
Vieux-Bourg	410 p. p. m.
Saint-Nicolas-du-Pelem	575 p. p. m.
Canihuel 1	125 p. p. m.
» 2	213 p. p. m.
Hennebont (Morbihan)	46 p. p. m.
Port Navalo	734 p. p. m.
Elven 1	365 p. p. m.
» 2	261 p. p. m.
Pleucadeuc	287 p. p. m.
Caudan	73 p. p. m.
Plouray	128 p. p. m.

Moyenne = 231 p. p. m. pour ces 26 échantillons.

GRANULITES

Kerfeunteun 1 (Fre)	56 p. p. m.
» 2	42 p. p. m.
» 3	82 p. p. m.
» 4	112 p. p. m.
» 5	45 p. p. m.
» 6	349 p. p. m.
» 7	245 p. p. m.
» 8	223 p. p. m.
Ergué Armel 1	80 p. p. m.
» 2	35 p. p. m.
» 3	133 p. p. m.
Langolen 1	137 p. p. m.
» 2	163 p. p. m.
» 3	178 p. p. m.
» 4	62 p. p. m.
Pluguffan 1	138 p. p. m.
» 2	55 p. p. m.
Plonéis 1	42 p. p. m.
» 2	110 p. p. m.
» 3	125 p. p. m.
» 4	41 p. p. m.
Plogastel Saint-Germain	74 p. p. m.
Saint-Yvi	84 p. p. m.
Saint-Evarzec 1	124 p. p. m.
» 2	277 p. p. m.
» 3	90 p. p. m.
Plozévet 1	61 p. p. m.
» 2	248 p. p. m.
» 3	
Loguivy-Plougras (C. du N.) 1	52 p. p. m.
» 2	140 p. p. m.
Le Faouët (Morbihan) 1	70 p. p. m.
» 2	57 p. p. m.
» 3	77 p. p. m.
» 4	112 p. p. m.
» 5	128 p. p. m.

Moyenne = 115 p. p. m. pour ces 35 échantillons.

GNEISS ET MICASCHISTES

Kerfeunteun(Fre) 1	620 p. p. m.
» 2	572 p. p. m.
» 3	50 p. p. m.
» 4	251 p. p. m.
» 5	347 p. p. m.
Pluguffan 1	590 p. p. m.
» 2	297 p. p. m.
La Forêt-Fouesnant 1	156 p. p. m.
» 2	102 p. p. m.
Plonéis	130 p. p. m.
Penhors 1	257 p. p. m.
» 2	213 p. p. m.
Plozévet	461 p. p. m.
Loguivy-Plougras (C. du N.)	290 p. p. m.
Ploemeur (Morbihan)	55 p. p. m.
Port Navalo (Morbihan)	536 p. p. m.

Moyenne = 307 p. p. m. pour ces 16 échantillons.

TABLEAU I (*suite*)

SCHISTES MICACÉS

Localité	Mn	Localité	Mn
Kerfeunteun (Fre) 1	306 p. p. m.	Scaer (Finistère)	135 p. p. m.
» 2	179 p. p. m.	Taulé	1328 p. p. m.
» 3	1611 p. p. m.	Penhors	626 p. p. m.
» 4	173 p. p. m.	Tréogan (C. du N.)	685 p. p. m.
Le Faou	132 p. p. m.	Le Faouet (Morbihan)	279 p. p. m.
La Forêt-Fouesnant	378 p. p. m.		
Plouvorn	160 p. p. m.		

Moyenne = 498 p. p. m. pour ces 12 échantillons.

SCHISTES TENDRES OU ARDOISIERS DU PRIMAIRE

Chateaulin 1 (Fre)	201 p. p. m.	Haut Corlay 1 (C. du N.)	473 p. p. m.
» 2	401 p. p. m.	» 2	1340 p. p. m.
Langolen	210 p. p. m.	Canihuel	433 p. p. m.
Pleyben	712 p. p. m.	Tréogan	450 p. p. m.
Brasparts	192 p. p. m.	Rostrenen 1	1672 p. p. m.
Botmeur	317 p. p. m.	» 2	425 p. p. m.
Carhaix	244 p. p. m.	Le Faouët (Morbihan)	135 p. p. m.
Lopérec 1	1865 p. p. m.	Elven	256 p. p. m.
» 2	313 p. p. m.	Branguily 1	291 p. p. m.
Chateauneuf du Faou	1108 p. p. m.	» 2	111 p. p. m.
Landrévarzec	633 p. p. m.		

Moyenne = 561 p. p. m. pour ces 21 échantillons.

AMPHIBOLITES		SERPENTINES	
Kerfeunteun 1 (Fre)	990 p. p. m.	Pouldreuzic 1 (Fre)	346 p. p. m.
» 2	1042 p. p. m.	» 2	536 p. p. m.
Pouldreuzic	1485 p. p. m.	Plovan	571 p. p. m.
Loguivy-Plougras (C. du N.)	1013 p. p. m.		
GRÈS			
Quéménéven (Fre)	44 p. p. m.		
Botmeur	47 p. p. m.		
Glomel (C. du N.)	112 p. p. m.		
Tréogan	72 p. p. m.		

Le nombre d'échantillons analysés est probablement insuffisant pour dégager des conclusions définitives ; cependant, il apparaît, d'une façon nette, que les roches ignées (granites et granulites) sont moins riches que les roches sédimentaires ou que les roches sédimentaires modifiées par métamorphisme (schistes micacés). Cette constatation peut avoir des conséquences pratiques importantes, comme nous le verrons dans la suite, sur la fréquence des cas de carences en manganèse, suivant les régions. Nous avions déjà mis en évidence un fait du même ordre, à propos d'un autre oligo-élément : le cuivre (9). Les teneurs en cuivre total trouvées pour les mêmes échantillons de roches étant celles-ci :

Granites	Moyenne	3,75 p.p.m. de Cu
Granulites		5,48 —
Gneiss et micaschistes		17,83 —
Schistes divers		22,72 —
Amphibolites		88,50 —

L'antagonisme roches ignées-roches sédimentaires est beaucoup plus marqué encore pour le cuivre que pour le manganèse et les amphibolites sont dans les deux cas les roches les plus riches. Il apparaît donc que, d'une façon générale, les roches les mieux pourvues en éléments minéraux (Calcium, Fer, Magnésium) sont aussi les mieux pourvues en manganèse et en cuivre.

La masse même des roches éruptives est très pauvre en éléments minéraux alors que des filons métallifères peuvent très bien exister dans les régions de roches éruptives ; on conçoit, de cette façon, l'existence de roches sédimentaires de teneurs bien supérieures aux roches éruptives.

Nous avons trouvé très peu de renseignements dans la littérature sur le manganèse des différentes roches, voici cependant quelques chiffres :

H. W. FAIRBAIRN (10) donne pour un granite 230 p. p. m. (en Mn) ; un calcaire 295 p. p. m. ; une pyroxénite 1 080 p. p. m. ; une diabase 1 240 p. p. m. ; une amphibolite 1 470 p. p. m.

L. R. WAGER et R. L. MITCHELL (11) donnent 385 p. p. m. pour un gneiss ; 930 p. p. m. pour un granite, enfin, pour différents échantillons d'olivines et de gabbros des chiffres voisins de 1 150 p. p. m. avec un maximum à 3 700 p. p. m.

Ces résultats sont assez bien en accord avec ceux trouvés par nous en Bretagne, mais, par contre, CLARKE cité par TOTH (13) donne des chiffres plus élevés pour les roches ignées que pour les roches sédimentaires soit, respectivement, 1 000 et 500 p. p. m.

3° Le manganèse dans les sols de Bretagne.

Une prise d'essai de 500 mg de terre fine, porphyrisée au mortier d'agate, est calcinée dans un petit creuset en platine. On verse sur le résidu, avec précaution, 2 à 3 cm³ d'acide fluorhydrique Dé 1,14 et une dizaine de gouttes d'acide sulfurique pur. On chauffe d'abord lentement au bain de sable, puis plus fort, jusqu'à disparition des fumées blanches et on calcine légèrement. La reprise se fait par l'acide nitrique dilué et chaud, de façon à épuiser le résidu avec moins de 50 cm³ de liquide, volume auquel on amènera la solution après oxydation. Il est bon d'attaquer une seconde fois le résidu et le filtre par $HF + SO_4H_2$ car il y reste, généralement, une petite quantité de manganèse. De cette façon, on dose bien le « Manganèse total » contenu dans les sols, tandis que les acides minéraux forts n'extraient pas la totalité du métal. L'acide nitrique et l'acide chlorhydrique purs donnent des résultats ne représentant que 70 p. 100 environ du manganèse total. La technique utilisée était la suivante pour le manganèse soluble à l'acide nitrique : la prise d'essai (1 g de terre fine), calcinée au rouge sombre, en capsule de porcelaine, est reprise par quelques centimètres cubes de NO_3H, puis évaporée à sec et de nouveau reprise

par NO_3H dilué et chaud ; on filtre et on épuise le résidu, puis on détermine Mn dans le filtrat amené à 50 cm³.

Le tableau II donne le manganèse contenu dans quelques sols cultivés provenant du département du Finistère ainsi que d'autres départements français.

TABLEAU II

Manganèse total contenu dans la couche arable de parcelles cultivées (Mn exprimé en p. p. m. de terre fine séchée à l'air).

SOUS-SOL GRANITIQUE		SOUS-SOL SCHISTEUX	
Kerfeunteun 1 (Fre)	230 p. p. m.	Gouézec 1 (Fre)	311 p. p. m.
» 2	300 p. p. m.	» 2	1100 p. p. m.
» 3	600 p. p. m.	Quéménéven	371 p. p. m.
» 4	128 p. p. m.	Dinéault	2019 p. p. m.
» 5	186 p. p. m.	Pleyben	1100 p. p. m.
» 6	532 p. p. m.	**LIMON ÉOLIEN**	
» 7	202 p. p. m.	Saint-Pol de Léon 1	542 p. p. m.
» 8	379 p. p. m.	» 2	656 p. p. m.
Ergué-Armel 1	227 p. p. m.	**AUTRES RÉGIONS FRANÇAISES**	
» 2	189 p. p. m.	Combourg (I. et V.)	509 p. p. m.
» 3	113 p. p. m.	Sens-de-Bretagne	348 p. p. m.
» 4	74 p. p. m.	Barfleur (Manche)	444 p. p. m.
» 5	326 p. p. m.	Grignon 1 (S. et O.)	700 p. p. m.
Plonéis 1	191 p. p. m.	» 2	500 p. p. m.
» 2	150 p. p. m.	Saint-Loup de la Salle (Saône et-Loire)	310 p. p. m.
Combrit 1	180 p. p. m.	Rosnay (Indre)	160 p. p. m.
» 2	200 p. p. m.		
Concarneau 1	210 p. p. m.		
» 2	350 p. p. m.		
Melgven	220 p. p. m.		
Penhars	128 p. p. m.		
Le Faouët 1 (Morbihan)	248 p. p. m.		
» 2	293 p. p. m.		
» 3	173 p. p. m.		
» 4	186 p. p. m.		

Moyenne = 228 p. p. m. pour les 25 échantillons de sols granitiques.

Nous avons relevé ci-dessous un certain nombre de teneurs en manganèse dans les sols de différents pays (tableau III).

Comme on le voit, ces teneurs des sols en Mn sont d'une extrême variété, puisqu'elles peuvent passer de 7 p. p. m., teneur correspondant réellement à la teneur d'un oligo-élément, à 1 p. 100 (10 000 p. p. m.), teneur du même ordre de grandeur que celle d'un macro-élément comme le potassium. ROBINSON (17) signale même que certains sols tropicaux peuvent en renfermer 11,6 p. 100. Pour les sols bretons, de même que pour bon nombre de sols étrangers, les teneurs en Mn sont, le plus souvent, comprises entre 100 et 2 000 p. p. m. Le chiffre moyen, pour les sols des régions granitiques et granulitiques 228 p. p. m. se rapproche beaucoup du chiffre moyen calculé pour les roches elles-mêmes (granites 231, granulites 115), tandis que les teneurs des régions schisteuses et des autres régions françaises sédimentaires sont nettement plus élevées, se rappro-

chant du chiffre moyen des schistes primaires 561 p. p. m. Les carences en manganèse ne sont pas occasionnées directement par une déficience en Mn total, mais par suite des chaulages, le taux de « Manganèse actif »

TABLEAU III

Teneur en Mn des sols de divers pays.

	Extrêmes	Moyenne
Etats-Unis		
État de New-Jersey-Blair et Prince (12)	100 et 1 940 p.p.m.	
État de New-Jersey-Toth (13)	30 et 5 200	
État d'Ohio-Vickar et Malcolm (14)	650 et 2 270	
État de Virginie-Price et Coll. (15) (pour 4 localités)	124 et 3 200	env. 800
Pour 26 sols américains, Sullivan et Robinson (16)	77 et 3 950	1 550
Pour divers sols des États-Unis-Robinson (17)	150 et 9 000	
Chiffres extrêmes pour les sols des U.S.A.-Clarke cité par Robinson (17)	7,7 et 9 800	930
Italie :		
Grand nombre de sols italiens-Contino (18)	72 et 1 150	400
Province d'Appulie-Della Gatta (19) (Mn soluble dans HCl)	520 et 2 200	1 100
Australie :		
Région 1 Teakle, Hoare, Thomas (20)	52 et 6 480	260
Région 2 Teakle, Hoare, Thomas (20)	36 et 275	
Région 3 Teakle, Hoare, Thomas (20)	60 et 770	
Formose :		
Chiu (21) pour 65 échantillons	72 et 1 028	

s'abaissera plus vite au-dessous du taux critique pour une terre pauvre que pour une terre riche en « Manganèse total ». Il nous semble bien, d'ailleurs, que les cas de carences graves des céréales en Bretagne soient plus fréquents en régions granitiques et granulitiques qu'en régions schisteuses.

B. — MANGANÈSE ACTIF

1° Formes du manganèse dans le sol.

Le manganèse existe dans les sols sous forme bivalente soluble et sous forme tri ou tétravalente insoluble. En sols très acides, une certaine fraction, de l'ordre de 1 p. 100 du stock total de manganèse, est extraite par l'eau et les sels neutres, tandis qu'en sols neutres et alcalins, ces réactifs n'extraient qu'une infime partie du total.

— Mn^{++} peut provenir, soit des solutions du sol elles-mêmes, soit de cations fixés par les colloïdes argileux et humiques.

— Mn^{+++} ou Mn^{++++} provient de divers oxydes. Des travaux assez nombreux ont été consacrés à cette question et, nous citerons ici, l'excellente mise au point de G. W. LEEPER (22) ainsi que celle de TROCMÉ,

BARBIER et CHABANNES (23). Du point de vue qui nous préoccupe, nous engloberons sous les termes « oxydes supérieurs » ou « oxydes manganiques » toutes les formules de Mn_3O_4 à MnO_2 régies par des équilibres d'oxydo-réduction :

$$Mn^{++} \rightleftarrows Mn^{+++} \rightleftarrows Mn^{++++}$$

FUJIMOTO et SHERMAN (24) ont étudié les sols d'Hawaï, très riches en manganèse, et admettent l'existence d'un complexe hydraté de la forme $(MnO)_x\ (MnO_2)_y\ (H_2O)_z$ pouvant se décomposer et libérer du Mn manganeux assimilable. Dans le cycle du manganèse du sol proposé par ces auteurs, interviennent d'abord des phénomènes d'oxydation et de réduction ainsi que des phénomènes d'hydratation et de déshydratation.

DION et MANN (25) proposent également un cycle du manganèse avec intervention de phénomènes de dismutation.

Comme il semble vraisemblable que le manganèse pénètre dans la racine des végétaux sous forme manganeuse bivalente, il est donc indispensable qu'existe, dans les sols, une quantité suffisante de Mn^{++}, ou, tout au moins, qu'existent des conditions favorisant un déplacement vers la gauche des équilibres d'oxydo-réduction. Dans ces conditions, les mesures de laboratoire, destinées à apprécier la capacité d'un sol à fournir le manganèse aux récoltes, ont porté, d'une part, sur les fractions extraites par l'eau et les sels neutres, d'autre part, sur la fraction des oxydes supérieurs facilement réduite par divers réducteurs ou facilement solubilisée dans les solutions acides faibles.

2° Manganèse extrait par l'eau distillée.

L'eau distillée donne une idée du manganèse contenu dans les solutions du sol. Pour les sols carencés bretons, dont le pH varie de 6,2 à plus de 7, les quantités ainsi extraites sont nulles ou très faibles : 0 à 0,2 p. p. m. de terre fine et sèche. Dans le cas de sols très acides, on extrait des quantités notablement plus fortes, par exemple pour 4 sols de pH compris entre 4,9 et 5,1, nous obtenons 0,5-0,7-1,0 et 4,9 p. p. m. de Mn.

Cette extraction à l'eau donne donc des quantités de manganèse grossièrement en relation avec leur capacité d'alimenter les végétaux, puisque les sols de pH inférieur à 6 ne donnent jamais lieu à des carences et que ce sont ces sols acides qui cèdent le plus de manganèse à l'eau.

3° Manganèse extrait par la solution d'un sel neutre.
(Manganèse dit « échangeable »).

On devrait théoriquement obtenir ainsi le manganèse échangeable mais d'autres phénomènes interviennent au cours de l'agitation ou du lessivage du sol avec la solution.

Il peut en effet se produire :

1° Une désorption de Mn^{++} vraiment fixé sur les colloïdes.

2° Une simple dissolution des oxydes supérieurs. TROCMÉ et coll. (23) ont en effet montré que la solubilité du sesquioxyde est appréciable.

3° Une réduction des oxydes supérieurs en présence de la matière organique du sol.

Dans le cas de sols au voisinage de la neutralité, la quantité de manganèse dit « échangeable » est très faible et probablement à peine supérieure à ce que donnerait le simple passage en solution des oxydes. Dans le cas de sols acides, nous pensons que les phénomènes de réduction jouent un rôle important au cours du contact sol-solution.

Pour des raisons de facilités analytiques, l'acétate d'ammonium est utilisé par un grand nombre d'agronomes, mais certains ont utilisé le nitrate de chaux ou le nitrate de magnésium. Ce dernier nitrate extrait, en général, plus de manganèse que le nitrate de chaux qui, lui-même, en extrait plus que l'acétate d'ammonium. GERRETSEN (cité par LEEPER) (22) a d'abord fixé à 2 p. p. m. de Mn extrait au $(NO_3)_2$ Mg la limite au-dessous de laquelle les plantes sont carencées, puis, il a ensuite élevé cette limite à 3 p. p. m. E. BOKEN (26) pour les sols danois et avec le même réactif donne 4 p. p. m. De toute façon, de nombreuses exceptions persistent et il semble fort difficile de fixer un seuil, même à l'intérieur d'un seul type de sol.

G. D. SCHERMANN et P. M. HARMER (27) fixent cette limite à 3 p. p. m. avec l'acétate d'ammonium. En Allemagne du Nord pour les sols sablonneux, P. SCHACHTSCHABEL (28) fixe comme limite 4 p. p. m. (extraction par $MgSO_4$), pour des sols de pH (KCl), supérieur à 5,8. En Bretagne, COÏC et COPPENET ont fixé cette limite à 1 p. p. m. (avec l'acétate d'ammonium) (1) : le manganèse dit « échangeable » pour les sols de cette province atteint rarement 2 p. p. m., il ne dépasse ce chiffre qu'en sols de pH inférieur à 6 et peut atteindre exceptionnellement 10 ou 15 p. p. m. dans les sols de pH égal ou inférieur à 5. Il est question, ici, de déterminations effectuées par agitation mécanique, de 30 minutes, de 25 g de terre, dans 250 cm^3 d'acétate d'ammonium neutre et normal : nous avons, d'ailleurs, vérifié, que les résultats obtenus sont très voisins de ceux que l'on obtient en lessivant sur filtre 30 g de terre par 400 cm^3 d'acétate d'ammonium. La durée de l'agitation présente une grande importance et les chiffres ci-dessous montrent que l'extraction se poursuit lentement jusqu'à 6 heures au moins, ce qui laisse supposer de l'importance non négligeable des phénomènes de pure dissolution et de réduction des oxydes manganiques.

Nous verrons, plus loin, que le manganèse extrait par les sels neutres est, avant tout, fonction du manganèse total et de l'état d'équilibre manganeux et manganique tributaire essentiellement du pH de la ma-

tière organique. Les déterminations précises de cette forme de manganèse du sol ne sont pratiquement pas possibles pour diverses raisons et, en particulier, par le fait que l'on travaille sur de très faibles quantités et que de nombreux facteurs chimiques, physiques et biologiques peuvent faire varier momentanément dans de fortes proportions ce manganèse dit échangeable (dessiccation à l'air, activités microbiennes, faibles variations de pH, etc.).

Temps d'agitation	Terre A (pH 6,6) Mn p. p. m.	Terre B (pH 6,7) Mn p. p. m.
6 minutes	0,93	0,56
20 minutes	1,25	0,60
35 minutes	1,30	0,75
1 heure	1,55	0,90
3 heures	2,20	1,20
6 heures	2,25	1,25

4° Manganèse facilement réductible
Tests d'activité des oxydes manganiques.

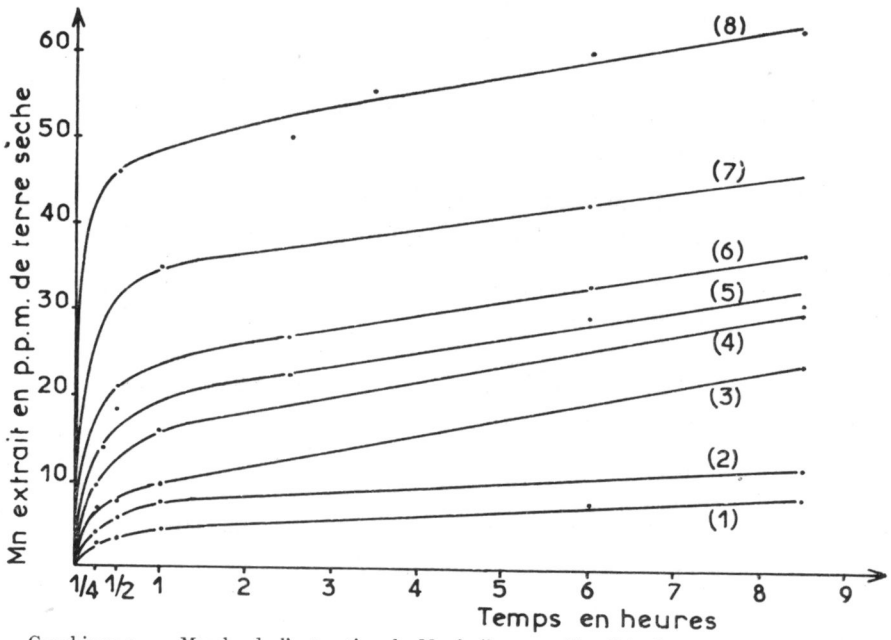
Pour compléter notre connaissance de l'équilibre Mn manganeux et Mn manganique, il importe que nous définissions, à présent, la fraction de Mn^{+++} ou de Mn^{++++} susceptible de réagir rapidement, c'est-à-dire d'être réduite facilement. Les différents auteurs, ayant travaillé sur ce problème, ont proposé un certain nombre de réactifs.

Robinson (W. O.) (17) estime que l'eau oxygénée est décomposée, à froid, en milieu neutre ou légèrement acide, par le bioxyde de manganèse présent dans les sols, beaucoup plus vite que par la matière organique de ceux-ci. On aurait ainsi un test de la présence de MnO_2 et la réaction serait d'autant plus violente que ce manganèse serait plus actif. Si l'on examine le nombre de cm^3 d'oxygène dégagés, on s'aperçoit qu'il est surtout fonction de la teneur totale en manganèse et que seuls les sols les plus riches donnent des volumes dégagés appréciables. Cette manière de déterminer une forme mobile de manganèse ne semble pas avoir été reprise par d'autres chercheurs.

Leeper (22, p. 82) signale un test qualitatif basé sur l'oxydation d'un sel de benzidine, en solution neutre, qui donne une coloration bleue très intense. Ce même auteur a proposé en 1935 l'emploi d'un réducteur, l'hydroquinone, qui réduirait la fraction active des oxydes manganiques (manganèse facilement réductible). Enfin, l'hyposulfite de sodium réduit une fraction plus importante de ces oxydes qui peut être considérée comme constituant les oxydes manganiques les moins actifs. Ces deux derniers réactifs font passer en solution, suivant les sols, une fraction du manganèse total pouvant varier de 2 à 50 p. 100, mais ici, intervient la durée de l'agitation du sol au sein du réactif, ainsi que, bien entendu, le pH, la

nature des oxydes, etc. LEEPER avait primitivement proposé un temps de contact de 7 heures, puis, par la suite, cet auteur (22, p. 82) recommande de ne pas dépasser un temps de contact de 30 minutes, de façon à éviter la réduction d'oxydes difficilement réductibles.

Nous avons étudié systématiquement la marche de la réduction des oxydes manganiques en fonction du temps, dans les conditions suivantes : agitation mécanique de 25 g de terre dans 250 cm³ d'acétate d'ammonium à pH 7, pendant 30 minutes, filtration : le filtrat contient le manganèse dit échangeable. Le résidu des 25 g de terre séché sur Büch-



Graphique 1. — Marche de l'extraction du Mn facilement réductible de 8 sols du Finistère.

ner est agité à nouveau pendant des temps variables, avec 250 cm³ du même acétate ayant dissous 0,2 p. 100 d'hydroquinone. Après filtration, on dose le Mn réduit, passé en solution dans le filtrat.

Le graphique I montre l'allure du phénomène pour des durées d'agitation variant de 5 minutes à 8 h 30 et pour 8 sols du Finistère, dont les 5 premiers (n° 1 à 5) sont carencés en manganèse. Les terres n° 6-7 et 8 ont été enrichies artificiellement par des apports de sulfate de manganèse.

Les courbes du graphique I sont des « courbes avec saturation » mais la saturation n'est pas encore atteinte au bout de 8 h 30. Sur un sol, nous avons observé, que l'extraction se poursuivait au moins jusqu'à 76 h ; voici les chiffres : 1 h, 6 p. p. m. ; 6 h, 21 p. p. m. ; 12 h, 25 p. p. m. ;

24 h, 30 p. p. m. ; 76 h, 38 p. p. m. Ensuite, nous avons poursuivi l'expérience jusqu'à une durée de 17 mois de contact sol-solution d'hydroquinone en agitant périodiquement les flacons. Les résultats sont donnés dans le tableau IV et indiquent, malgré certaines irrégularités dans les chiffres, que le maximum est sensiblement atteint pour une semaine de contact. (Les flacons ont été abandonnés d'une part à la température ambiante, d'autre part, au frigidaire à + 4°.)

TABLEAU IV

	Sol 1		Sol 2		Sol 3
	Température ordinaire	+ 4°	Température ordinaire	+ 4°	+ 4°
1 heure	8 p. p. m. (1)	8 p. p. m.	—	—	129 p. p. m.
1 semaine	—	26	—	30 p. p. m.	468
2 semaines	21	20	32,5 p. p. m.	26	504
3 semaines	21,5	—	28,0	—	—
8 semaines	—	26,5	—	38	680
3 mois	23,5	—	31,5	—	—
17 mois	—	44	—	37	550
Mn total	201		158		2010

(1) Résultats exprimés en p. p. m. de Mn par rapport à la terre séchée à l'air.

Dans une précédente étude, parue dans ces Annales Agronomiques en 1952 (29), nous avions adopté un temps d'agitation de 1 heure pour la détermination du manganèse facilement réductible, aussi, tous les dosages effectués dans la suite de ce travail l'ont été dans ces conditions. La solution d'acétate d'ammonium à 0,2 p. 100 d'hydroquinone fait donc passer en solution, au bout d'un temps assez long, une fraction relativement bien définie de manganèse mais, il n'est pas pratique d'aller à ce terme, et, d'autre part, il n'est absolument pas certain que ce terme corresponde à une exigence de la physiologie végétale. Le temps d'agitation de 1 h est suffisant pour l'obtention de résultats reproductibles et il accuse les différences entre sols par comparaison avec des temps d'agitation plus longs. Par exemple : rapport des Mn facilement réductibles Terre n° 2 sur Terre n° 1 : pour 1/2 heure 1, 62 ; pour 8 h 30 : 1,35 ; Terre n° 8 sur Terre n° 7, pour 1/2 heure : 1,46 et pour 8 h 30 : 1,36 (voir graphique I).

Manganèse échangeable et manganèse facilement réductible des sols bretons.

Dans un but agronomique, un certain nombre d'échantillons de couche arable de sols de culture ont été soumis à l'analyse au point de vue manganèse. Nous rappelons les conditions d'extraction : 25 g de terre, 250 cm³ d'acétate d'ammonium neutre, agitation pendant 30 minutes

puis 250 cm³ d'acétate d'ammonium à 0,2 p. 100 d'hydroquinone pendant 1 heure. Dans le tableau V, nous donnons quelques résultats en même temps que les pH et la teneur en manganèse total. Il apparaît que les sols

TABLEAU V

TABLEAU V

Différentes formes du Manganèse de sols finistériens.

	N°	pH	Manganèse en p.p.m. de terre fine séchée à l'air		
			échangeable	réductible	total
Sols carencés	1	7,1	0,28	2,7	202
	2	6,7	0,92	5,0	113
	3	6,9	0,30	7,5	128
	4	7,3	0,80	7,5	-
	5	6,4	0,28	8,0	189
	6	6,9	1,10	11,0	326
	7	7,1	0,55	11,0	379
	8	7,0	0,80	13,0	-
	9	6,5	0,44	14,0	-
	10	6,8	0,56	12,5	311
	11	7,1	0,92	16,5	332
	12	6,4	0,60	18,0	-
	13	6,25	1,17	20,0	326
	14	6,3	1,66	29,0	-
Sols non carencés	15	7,0	1,16	24,0	470
	16	6,1	0,8	23,0	346
	17	6,1	1,3	9,0	281
	18	6,7	0,9	42,0	371
	19	7,5	1,7	50,5	585
	20	6,2	0,75	64,0	1100
	21	5,8	0,4	83,0	-
	22	7,1	1,2	200,0	720
	23	6,0	1,9	129,0	2020
	24	5,7	3,5	65,0	1000
Sols non carencés très acides	25	4,95	9,7	23,5	403
	26	4,9	1,2	10,0	186
	27	4,7	3,1	15,0	281
	28	4,9	3,6	35,0	451
	29	4,9	6,0	72,0	532
	30	5,15	1,8	18,0	547

carencés, dont le pH est au moins égal à 6,2, ont un Mn échangeable généralement inférieur à 1 p. p. m. et un Mn réductible inférieur à 20 p. p. m. On remarquera également le Mn échangeable plus élevé dans le cas des sols de pH inférieur à 6 et enfin, un certain parallélisme, pour un même pH, entre Mn échangeable, Mn facilement réductible et Mn total.

Méthode Bittel de détermination rapide du manganèse actif.

R. BITTEL a donné une méthode (30), basée sur l'extraction MORGAN, en présence de chlorhydrate d'hydroxylamine comme réducteur. Cette technique très rapide nous semble intéressante pour tester les sols au point de vue agronomique. Les sols bretons carencés, de pH (eau) voisin de 6,5, laissent passer en solution, dans le réactif tamponné à pH 4,8, des quantités de « Mn actif » généralement inférieures à 15 p. p. m.

5° Transformation du sulfate manganeux enfoui dans le sol.

Le sulfate de manganèse, incorporé aux sols de pH égal ou supérieur à 6, est rapidement oxydé et ne peut pas en être extrait par la solution des sels neutres. Voici, par exemple, la marche du phénomène pour une terre de Bretagne carencée en manganèse de pH 6,8, manganèse échangeable 0,50 p. p. m., manganèse réductible 12,5 p. p. m.

Protocole expérimental. — La terre, à laquelle on vient d'ajouter une quantité donnée de solution de SO_4Mn, $1H_2O$, est maintenue à une humidité de 20 p. 100 et à une température voisine de 15°. On prélève, au bout de périodes variables, un poids connu de terre, sur lequel on détermine la fraction de manganèse extraite par l'acétate d'ammonium.

Période de temps écoulée depuis l'introduction de SO_4Mn	Mn échangeable	
	Mn ajouté	
	14 p. p. m.	140 p. p. m.
8 minutes	8,4 p. p. m.	
1 heure	8,4	95 p. p. m.
3 heures	7,06	—
6 heures	6,6	87
15 heures	3,85	—
24 heures	2,4	85
31 heures	1,32	—
39 heures	0,68	—
2 jours	—	60
3 jours	—	40
5 jours	0,5	—
10 jours	—	1,06
30 jours	0,3	1,5
6 mois	0,6	0,4

L'examen de ces chiffres montre qu'une fraction de 30 à 40 p. 100 du manganèse total introduit est immobilisée immédiatement, tandis que le reste est fixé plus lentement, en suivant une marche continue d'une durée de 2 à 10 jours, suivant la quantité ajoutée au départ. Cette seconde fraction est probablement immobilisée par oxydation biologique comme de nombreux auteurs l'affirment. TROCMÉ et coll. (23) ont, en particulier, bien mis en évidence l'importance de cette fixation biologique en blo-

quant le phénomène par l'azide de sodium ou le toluène. Il reste, néanmoins, une fraction importante qui semble fixée rapidement par des phénomènes chimiques ou physico-chimiques, mais aucune expérience n'a pu en mettre en lumière le mécanisme théorique (blocage par adsorption irréversible sur les argiles ?, le calcaire lorsqu'il existe ?, les humates ?, etc.). GUENNELON (31) envisage l'oxydation, par voie chimique, de Mn^{++} par le cobalt, selon le schéma théorique suivant : $Mn^{++} + 2Co^{+++} \rightarrow Mn^{++++} + 2Co^{++}$. L'auteur a vérifié, que le barbottage d'air dans une solution de sulfate manganeux, en présence de Co_2O_3, provoque l'oxydation d'une petite quantité de manganèse ; enfin, il a observé également, que l'addition d'une suspension d'hydroxyde de cobalt à un sol, (dose de l'ordre de grandeur des quantités de cobalt préexistant dans les sols), diminue sensiblement le manganèse extrait par l'acétate d'ammonium. Ces faits demanderaient à être étudiés plus en détail sur d'autres types de sols.

Manganèse réduit par l'hydroquinone. — Dans la fraction extraite par la solution d'acétate d'ammonium, à pH 7, contenant 0,2 p. 100 d'hydroquinone, après 1 heure d'agitation, on retrouve une proportion importante du manganèse ajouté. Voici quelques exemples :

Terre	Avant l'apport de SO_4Mn			Quantité de Mn ajoutée en p. p. m. de terre sèche	Un mois après apport de SO_4Mn		
	pH	Mn échangeable	Mn réductible		pH	Mn échangeable	Mn réductible
N°1	6,8	0,5	12,5	14	6,8	0,5	22,5
				140		1,5	133
N°2	7	0,4	6	500	6,55	4,8	284
				1000	6,2	30,0	576
N°3	6,2	1,0	46	750	5,9	3,0	450
N°4	6,5	0,8	40	1000	5,05	11,0	515
N°5	5	4,0	25	250	4,85	30,0	122
N°6	4,9	6,0	72	500	4,6	300,0	98
				1000	4,5	692,0	132

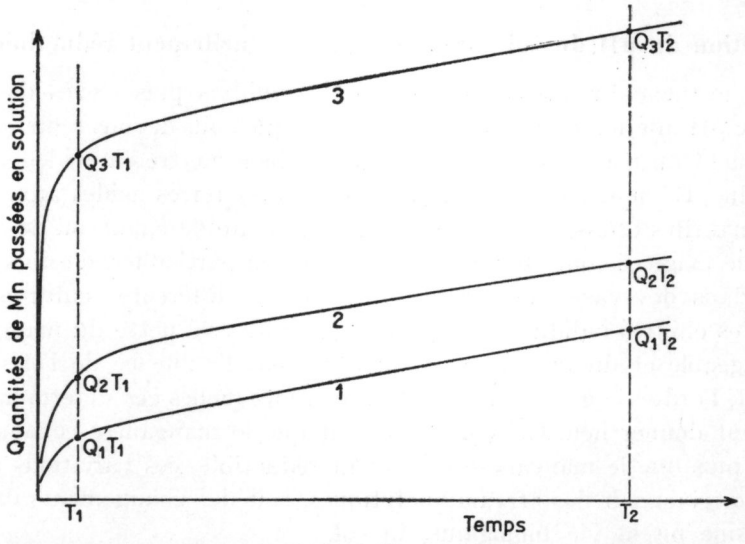
Le manganèse réductible trouvé après l'addition du sulfate de manganèse, diminué du manganèse réductible préexistant, représente, presque toujours, au moins la moitié du manganèse ajouté. Une fraction importante du manganèse de SO_4Mn passe donc assez rapidement sous une forme oxydée, difficilement réductible, sauf pour des pH finaux du sol de l'ordre de 4,5 (n° 6 du tableau ci-dessus). Pour des sols très acides, le manganèse ajouté reste, en grande partie, sous forme Mn^{++} (échangeable) car les conditions nécessaires à son oxydation n'existent plus.

Lorsque l'on ajoute à une terre des quantités importantes de sulfate de manganèse de l'ordre de 5 à 10 tonnes par hectare, on abaisse notablement le pH de cette terre, ce qui pourrait contribuer à l'élévation des

quantités de Mn échangeable et de Mn réductible. Pour éliminer ce facteur « variation du pH », consécutif à l'acidification provoquée par incorporation d'un sulfate, nous avons réalisé l'expérience ci-dessous :

Des quantités de 100, 200, 500 et 1 000 p. p. m. de Mn sont ajoutées à une terre carencée sous forme de SO_4Mn, H_2O, en même temps que des quantités de chaux calculées de façon à ce que le pH reste fixe. Les analyses effectuées au bout de 3 mois donnent les résultats suivants :

	ph	Mn échangeable	Mn réductible	Mn total	Rapports $\frac{\text{Mn actif}}{\text{Mn total}} \times 100$
Terre au départ	7,1	0,5 p. p. m.	9 p. p. m.	260 p. p.m.	3,65
Terre après addition de :					
100 p. p. m. de Mn.....	7,1	3,6	54	362	15,9
200 p. p. m. de Mn.....	7,0	6,8	78	530	16,0
500 p, p. m. de Mn.....	7,0	9,8	276	1062	27,0
1000 p. p. m. de Mn.....	6,85	22,5	400	1530	27,6



Graphique 2 — Marche de l'extraction de Mn facilement réductible en fonction du temps. Variations des rapports des quantités extraites après quelques minutes, aux quantités extraites après plusieurs heures suivant la richesse des sols.

Cette expérience, nous montre bien, les relations existant entre Mn échangeable, Mn réductible et Mn total, pour des pH très voisins, dans un sol ayant reçu du sulfate de manganèse. Ces relations sont d'ailleurs assez voisines dans le cas de sols naturels, différents par leur teneur en Mn total. Les rapports du Manganèse actif au Manganèse total, donnés dans la colonne de droite, indiquent un accroissement en fonction de Mn total et ce phénomène est généralement observé lorsqu'on ajoute des doses croissantes de SO_4Mn à un sol. Ceci est à rapprocher du fait que, les rapports des quantités de Mn extraites pendant les premières minutes de

contact aux quantités extraites au bout de plusieurs heures de contact sont plus élevés pour les sols les plus riches en Mn total, donc, en Mn facilement réductible. Si nous revenons au graphique I, nous pouvons calculer que les rapports $\frac{\text{Mn réduit aprés 30 minutes}}{\text{Mn réduit après 8 h 30}}$ s'élèvent avec la richesse des sols. Une exception est cependant à signaler à propos des nº 1 et 2 qui, très pauvres en Mn, ont des courbes d'allure un peu différente :

Nº 1, 0,40 ; Nº 2, 0,48 ; Nº 3, 0,32 ; Nº 4, 0,42 ; Nº 5, 0,51 ; Nº 6, 0,57 ; Nº 7, 0,68 ; Nº 8, 0,73.

Dans une série de courbes avec saturation, nous avons, en effet :

$$\frac{Q_3(T_1)}{Q_3(T_2)} > \frac{Q_2(T_1)}{Q_2(T_2)} > \frac{Q_1(T_1)}{Q_1(T_2)}.$$ (Voir aussi graphique II)

Ces différentes observations tendent à prouver que le manganèse du sulfate de manganèse incorporé à un sol se comporte, au bout d'un certain temps, comme le manganèse préexistant dans ce sol.

6º Action du pH du sol sur le Manganèse facilement réductible.

L'examen du tableau V indique des chiffres plus élevés dans les sols de pH inférieur à 6 mais, il est évident, que nous devons tenir compte également du manganèse total. De façon à bien mettre en évidence l'action du pH, nous sommes partis de différentes terres acides auxquelles des quantités croissantes de chaux, de carbonate de chaux ou de carbonate de magnésie ont été ajoutées. Il s'agit, en particulier, d'essais effectués dans des vases de végétation soumis à différentes cultures.

Ces chiffres indiquent, en plus de la chute très nette du manganèse échangeable et du manganèse réductible sous l'influence de l'élévation de pH, l'ordre de grandeur des variations auxquelles ces déterminations peuvent donner lieu. On voit également que le manganèse échangeable varie plus que le manganèse facilement réductible, ces variations ayant pour origine, soit des erreurs analytiques, soit des changements dans le chimisme ou la vie biologique du sol.

Le pH des sols de Bretagne passant de 5 à 7, on observe donc, approximativement, une diminution de 50 p. 100 du manganèse réduit par l'hydroquinone, au bout d'une heure d'agitation ; le manganèse échangeable diminue, lui, de 4 à 10 fois pour une même élévation de pH.

7º Action du pH de l'acétate d'ammonium au cours de l'extraction du manganèse échangeable et du manganèse réductible.

Au cours de l'agitation d'une terre acide au sein d'un acétate d'ammonium à pH 7, les phénomènes d'échanges abaissent très peu le pH de la solution, par contre, les phénomènes de réduction, au contact de la ma-

Terre nº 1. — *Addition de carbonate de chaux.*

	Après 10 mois			Après 18 mois		
	pH	Mn échangeable	Mn réductible	pH	Mn échangeable	Mn réductible
Pot témoin	4,6	4	14	4,9	3,8	14
Pot dose 1	6,25	1,1	10,5	6,25	0,7	10,5
Pot dose 2	7,25	1,2	5,0	7,3	1,5	7,0

	Après 2 ans 1/2			Après 3 ans 1/2		
Pot témoin	4,65	3,7	14,2	4,8	4,7	18,5
Pot dose 1.....	6,15	0,7	9,4	5,9	0,8	10,0
Pot dose 2.....	6,85	0,4	6,0	7,1	0,7	8,5

Terre nº 2. — *Addition de carbonate de chaux.* Dosage après 8 mois.

	pH	Mn échangeable	Mn réductible
Pot-Témoin	4,6	3,8	27
Pot-dose 1	6	0,7	18
Pot-dose 2	6,9	0,4	10,5
Pot-dose 3	7,15	0,9	10,5

Terre nº 3. — *Addition de carbonate de chaux.* Dosage après 8 mois.

	pH	Mn échangeable	Mn réductible
Pot-Témoin	4,9	3,6	35
Pot-dose 1	6,35	0,7	24
Pot-dose 2	7,0	1,9	22,5
Pot-dose 3	7,1	0,7	19,5

Terre nº 4. — *Addition de carbonate de chaux.* Dosage après 8 mois.

	pH	Mn échangeable	Mn réductible
Pot-Témoin	4,7	12,4	52
Pot-dose 1	5,6	1,1	38
Pot-dose 2	6,5	1,1	27,5

Terre nº 5. — *Addition de carbonate de magnésie.* Dosage après 8 mois.

	pH	Mn échangeable	Mn réductible
Pot-Témoins	5,05	3,5	47
Pot-dose 1	6,2	0,9	24,5
Pot-dose 2	6,6	1,1	18,5
Pot-dose 3.	7,1	1,7	19,5

tière organique acide, peuvent être importants et ceci expliquerait pourquoi une terre acide laisse passer en solution plus de Mn réductible que la même terre chaulée.

Après 1 heure d'agitation de 25 g de terre dans 250 cc d'acétate plus hydroquinone, nous avons observé comme pH de la solution, des valeurs de 6,8 à 6,9 pour des terres de pH 4,9, soit un abaissement très faible du pH de la solution neutre à l'origine. Si l'on extrait Mn échangeable et Mn réductible, non plus avec un acétate neutre, mais avec un acétate ajusté à pH 6, les résultats seront beaucoup plus forts et c'est ce que montrent les chiffres ci-dessous :

Terre n° 1 de pH 6,2 :

Acétate d'ammonium pH7-Mn échangeable	4 p.p.m.
Mn réductible	35 p.p.m.
Acétate d'ammonium pH6-Mn échangeable	3,7 p.p.m.
Mn réductible	54 p.p.m.

Terre n° 2 de pH 6,8 :

Acétate d'ammonium pH7-Mn échangeable	0,6 p.p.m.
Mn réductible	8 p.p.m.
Acétate d'ammonium pH6-Mn échangeable	1,3 p.p.m.
Mn réductible	26,5 p.p.m.

Le manganèse facilement réductible est augmenté de plus de trois fois pour la terre n° 2, le manganèse échangeable étant doublé. Sur la terre N° 1, l'action n'apparaît pas pour Mn échangeable mais l'augmentation de Mn réductible est notable.

Temps d'agitation	Terre 1 : pH 6,2 Mn en solution		Terre 2 : pH 6,0 Mn en solution	
	A	B	A	B
30 minutes.....	19 p. p. m.	22,5 p. p. m.	46 p. p. m.	55 p. p. m.
2 heures 30	23	32	50	67
6 heures	29,5	39,5	60	70
8 heures 30	31	44,5	62	75

On peut se rendre compte, d'une autre manière, de l'influence du pH de la matière organique au cours de l'agitation. Nous avons comparé les résultats obtenus au cours de l'agitation du sol en présence d'hydroquinone, après élimination préalable de Mn échangeable et sans élimination.

Dans un cas (A), on agite la terre, d'abord avec l'acétate seul, puis avec l'acétate plus 0,2 p. 100 d'hydroquinone. Dans l'autre cas (B), on agite directement avec l'acétate plus hydroquinone.

La marche de l'extraction est plus rapide au cours des premières minutes, dans le cas B, mais elle est ultérieurement parallèle à la marche, dans le cas A, qui est le cas normal. Après 1/2 heure d'agitation avec l'acé-

tate d'ammonium neutre, la matière organique acide est partiellement neutralisée et son pouvoir réducteur est atténué au moment de l'agitation avec acétate + hydroquinone, tandis que dans le cas B, on met directement en contact la matière organique acide avec l'acétate + hydroquinone.

8° Rôle de la matière organique.

La matière organique semble, à première vue, jouer un rôle contradictoire dans le passage en solution du manganèse. D'une part, elle gêne cette mise en solution, d'autre part, elle favorise la réduction des oxydes supérieurs donc leur solubilisation. Nous pensons qu'il faut prendre surtout en considération le pH de cette matière organique.

a) **Action défavorable.** — Les carences en manganèse sévissent, généralement, dans les sols très humifères ou tourbeux. En Bretagne, les sols où se manifestent des carences graves sur céréales ont une teneur en azote total de 2,5 à 4,5 p. 1 000, pour une matière organique totale de 60 à 90 p. 1 000. Ces teneurs, nettement supérieures à celles des sols de limon de la région parisienne ainsi qu'à celles de l'ensemble des sols français, sont cependant encore caractéristiques de sols minéraux. En utilisant comme critère de l'action de la matière organique le rapport $\frac{\text{Mn actif}}{\text{Mn total}} \times 100$, nous constatons que ce rapport est, généralement, compris entre 3 et 6 pour les terres finistériennes carencées. Dans le cas de l'ensemble des sols bretons, quel que soit leur pH, sur roches granitiques ou schistes primaires, ce rapport est presque toujours inférieur à 10. Par contre, pour 7 terres en provenance d'autres régions françaises (Ille-et-Vilaine, Manche, Seine-et-Oise, Saône-et-Loire, Indre), nous avons trouvé un rapport variant de 20 à 37. L'azote total de ces 7 sols était compris entre 0,75 et 1,5 p. 1 000 et la réaction était neutre ou alcaline, donc nous pouvons penser qu'il y a bien une relation inverse : teneur en matières organiques-rapport Mn actif sur Mn total. Toutefois, nous ne pouvons affirmer par ces seuls exemples qu'il n'y a pas de différences dans la nature même des oxydes manganiques.

Heintze et Mann (32) ont fait, en Grande-Bretagne, des observations mettant aussi en évidence l'action de la quantité de matières organiques sur le rapport Mn actif/Mn total ; voici quelques-uns de leurs résultats pour des sols de pH compris entre 7 et 8 :

Azote total p. 1 000 : 0,26 à 1,62 ; $\frac{\text{Actif}}{\text{total}} \times 100 = 43$ à 68.

Azote total p. 1 000 : 1,86 à 4,35 ; $\frac{\text{Actif}}{\text{total}} \times 100 = 16$ à 42.

Azote total p. 1 000 : 12,0 à 22,0 ; $\frac{\text{Actif}}{\text{total}} \times 100 = 12$ à 22.

Tous ces rapports, même dans les sols beaucoup plus riches en azote total que les sols de Bretagne, sont nettement plus élevés.

Les auteurs désignés ci-dessus pensent que le manganèse réduit par l'hydroquinone est retenu, partiellement, par la matière organique et ceci d'autant plus que la quantité de cette matière organique est plus forte.

Divers chercheurs ont pensé que le manganèse du sol pouvait donner lieu à des complexes peu dissociables avec l'humus des sols.

S. G. HEINTZE (33) détermine une forme de Mn divalent complexé avec la matière organique des sols organiques alcalins, grâce à une solution de versenate (disodique, monocalcique). Cette fraction représenterait 10 à 20 p. 100 du manganèse total contenu dans les sols et des essais d'électrophorèse et de dialyse prouvent l'existence de complexes de types différents.

Enfin, selon TROCMÉ et coll. (23), l'origine des carences en manganèse, provoquées par l'épandage des eaux d'égouts dans la région parisienne, s'expliquerait ainsi : les résidus humiques accumulés à la surface des particules minérales rendent le manganèse difficilement accessible aux corps susceptibles de le réduire ou de le dissoudre et ceci, bien entendu, pour des sols de réaction neutre ou légèrement alcaline.

b) **Action favorable.** — Les auteurs cités ci-dessus, TROCMÉ et coll. (23), ont montré, de plus, l'action favorable d'acides humiques de tourbe sur le maintien de Mn à l'état échangeable, donc divalent, ainsi que l'activité réductrice des matières organiques en voie d'oxydation. R. BETREMIEUX (34), dans son travail sur le fer et le manganèse dans les sols, a bien mis en évidence que le manganèse est, par réduction, plus mobile que le fer sous l'influence de deux facteurs qui doivent exister simultanément :

1. — Présence de matières organiques convenables.
2. — Présence d'une humidité suffisante.

Si nous considérons l'analyse des profils de sols acides ci-dessous, nous verrons que le rapport Mn actif/Mn total diminue avec la profondeur, donc avec la matière organique. On est en droit de penser qu'il s'agit bien de l'activité réductrice de cette matière organique acide pendant l'agitation en présence d'acétate d'ammonium plus hydroquinone. (Notons que la fraction « acide humique » de la matière organique totale, qui a été dosée pour certains profils, diminue également avec la profondeur.) Le rapport du manganèse échangeable au manganèse total diminue, lui aussi, avec la profondeur, mais les résultats sont par trop irréguliers et il est préférable de considérer la somme Mn échangeable + Mn facilement réductible, soit « Mn actif ».

1° *Podzol humo-ferrugineux typique* (*Mont Saint-Michel de Brasparts. Finistère*).

Horizon	A_1	A_2	B_1	B_2	C
pH	4,1	4,15	4,0	4,35	4,75
Mn échangeable en p.p.m.	1,36	1,0	0,3	0,84	3,1
Mn réductible en p.p.m.	4,1	1,15	0,45	0,55	1,4
Mn total en p.p.m.	24,0	22,2	46,5	134,0	138,0
$\frac{\text{Actif}}{\text{Total}} \times 100$	**22,6**	**10,3**	**1,6**	**1,1**	**3,3**
Matières organiques totales	**3,4**	**0,6**	**6,2**	**2,8**	**0,8**

L'horizon B_1 est l'horizon d'accumulation humique mais, ici, l'élévation de la teneur en matières organiques ne se traduit pas par une élévation du rapport actif/total. On remarquera, également, la faiblesse du manganèse actif dans les horizons profonds et il en sera de même pour les profils suivants. Le manganèse a été fortement lessivé jusqu'à l'horizon B_2 puisque Mn total passe de 22 p. p. m. en A_2 à 134 p. p. m. en B_2.

2° *Sol podzolique sur granite* (*Huelgoat, Finistère*).

Horizon	A_1	A_2	B	C
pH	4,2	4,3	4,5	4,7
Mn échangeable	2,2	0,4	0,36	0,36
Mn réductible	2,5	2,75	1,6	2,3
Mn total	64,0	55,0	106,0	205,0
$\frac{\text{Total}}{\text{Actif}} \times 100$	**7,2**	**5,6**	**1,5**	**1,1**
Matières organiques totales	**30,0**	**6,3**	**3,5**	**2,2**

La diminution du rapport Mn actif/Mn total avec la profondeur est encore très nette ici. Le pH augmente légèrement avec la profondeur, ce qui est normal pour des sols podzoliques où la fraction organique est plus acide que la fraction minérale. Cette élévation du pH joue également dans le sens d'une diminution du rapport, mais nous pensons que c'est bien la diminution de la quantité de matières organiques acides qui est déterminante.

3° *Sol podzolique sur schistes durs* (*Huelgoat, Finistère*).

Horizon	A_2	B_1	B_2	B_3	B_C	C
pH	4,1	4,35	4,8	5,25	5,4	5,1
Mn échangeable	1,75	2,3	0,5	1,36	2,9	2,0
Mn réductible	13,5	5,0	11,5	11,0	69,0	9,0
Mn total	78,0	61,0	173,0	575,0	1 020,0	250,0
$\frac{\text{Actif}}{\text{Total}} \times 100$	**20**	**11,4**	**6,7**	**2,2**	**7,1**	**4,3**
Matières organiques totales	**13,3**	**11**	**7**	**6,8**	**4,5**	**1,2**

Dès que l'on atteint l'horizon B_2, les relations entre Mn actif et matières organiques ne sont plus aussi nettes. A partir d'une certaine profondeur, dans les types podzoliques, la matière organique est, d'ailleurs, constituée par les acides humiques et les acides fulviques susceptibles de migrer. D'autre part, les horizons d'accumulation, très enrichis en manganèse total, donnent des quantités plus élevées de Mn actif (cas de l'horizon Bc).

4° *Sol brun sur schistes de Chateaulin (carbonifère) (Pleyben, Finistère).*

Horizon	A_1	A_2	A_3	C
pH	5,7	5,0	4,65	4,5
Mn échangeable	3,5	5,0	3,0	2,1
Mn réductible	65,0	29,0	55,5	21,0
Mn total	1 000,0	1 066,0	900,0	553,0
$\frac{\text{Actif}}{\text{Total}} \times 100$	**6,8**	**3,2**	**6,5**	**4,2**
Matières organiques totales	**11,8**	**6,0**	**3,2**	**1,1**

Il y a lieu de remarquer ici le pH élevé de l'horizon A_1 (influence d'un apport de calcaire). Dans ce profil de sol brun, les pH diminuent avec la profondeur mais le rapport Actif/Total diminue, lui aussi, malgré des irrégularités.

5° *Sol brun sur granulite (Ergué Armel. Finistère).*

Profondeur en cm	0-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80
pH	4,8	4,7	4,8	4,7	4,75	4,7	4,8
Mn échangeable	3,16	1,0	1,56	0,92	1,52	1,0	1,0
Mn réductible	15,0	11,0	10,0	10,0	9,5	10,5	22,5
Mn total	281,0	288,0	326,0	360,0	331,0	404,0	484,0
$\frac{\text{Actif}}{\text{Total}} \times 100$	**6,4**	**4,17**	**3,53**	**3,06**	**3,33**	**2,85**	**4,85**
Matières organiques	**8,7**	**7,8**	**6,6**	**4,5**	**2,8**	**2,3**	**1,8**

Dans ce profil, où la matière organique est élevée jusqu'à une grande profondeur, le pH est uniforme et la chute du rapport Mn actif/Mn total assez régulière.

L'examen de ces tableaux semble bien indiquer que les matières organiques acides facilitent la réduction et la mise en solution du manganèse des oxydes manganiques, alors que les matières organiques des sols neutres et alcalins auraient un rôle inverse.

CONCLUSIONS SUR LA DÉTERMINATION DU « MANGANÈSE ACTIF »

Les résultats du dosage du manganèse des sols réductible par l'hydroquinone à 0,2 p. 100 dans l'acétate d'ammonium (manganèse facilement réductible) dépendent essentiellement des facteurs suivants :

a) quantité totale de Mn présente dans le sol,

b) nature minéralogique et chimique des oxydes manganiques,

c) pH du sol,

d) proportion de matières organiques.

Il est bien évident, que les deux premiers facteurs conditionnent, d'abord, le résultat de la réduction, puis viennent la quantité et le pH de la matière organique. La présence de matières organiques acides, au cours de l'agitation du sol dans la solution d'acétate, favorise la réduction et le passage en solution de manganèse. Si l'on utilise un acétate acide au lieu d'un acétate neutre, on obtient de même des résultats plus élevés. A l'analyse de profils de sols acides, on constate que le rapport Mn réductible sur Mn total diminue avec la profondeur, donc avec la quantité de matière organique présente.

Lorsque l'on neutralise un sol acide par de la chaux ou du calcaire, les substances organiques perdent une grosse partie de leur pouvoir réducteur, et le manganèse réductible diminue ; ce qui pourrait s'expliquer également selon certains auteurs par un pouvoir de rétention accru vis-à-vis de Mn réduit.

Les matières organiques des sols, de pH compris entre 7 et 8, diminuent d'autant plus la réduction du manganèse, qu'elles sont plus abondantes et, c'est ce qu'ont observé HEINTZE et MANN en Grande-Bretagne (voir Chapitre « Rôle de la matière organique »).

A propos du manganèse échangeable, nous pourrions faire les mêmes remarques, les mêmes facteurs interviennent et les phénomènes de réduction des oxydes manganiques se produisent dans le cas des sols acides au cours de l'extraction du manganèse échangeable. Les déterminations très précises de Mn échangeable n'étant pas possibles, il est préférable d'utiliser Mn facilement réductible ou la somme des deux que l'on qualifie de « Manganèse actif ».

C. — ÉVOLUTION DU MANGANÈSE AU COURS DES PHÉNOMÈNES PÉDOLOGIQUES

Le manganèse est l'un des oligo-éléments ayant donné lieu à un très grand nombre de travaux de laboratoires et de recherches sur son importance agronomique, par contre, il a été très peu étudié du point de vue pédologique. Dans la littérature se rapportant à cette question, on

trouve un certain nombre de dosages de manganèse total en fonction des différents horizons d'un profil mais, très peu sur une forme plus mobile par analogie avec le fer dit « libre ». ROBINSON (W. O.) (17) donne Mn total pour un certain nombre de profils de sols des États-Unis où deux types principaux de répartition se distinguent : diminution progressive avec la profondeur ou accumulation dans le sous-sol.

SHERMAN (G. D.) et coll. (35) donne quelques indications sur la répartition de Mn actif, il signale que de nombreux sols du groupe gris-brun-podzolique ont leur Mn actif concentré dans l'horizon A ; enfin, il trouve certains profils avec accumulation en C. L'auteur ne donne pas d'indications sur le manganèse total.

LEEPER (G. W.) (22), dans sa mise au point, signale les principaux types suivants de répartition du Mn total :

1° Accumulation en surface, diminution en dessous, puis augmentation avec la profondeur (sols lessivés).

2° Décroissance progressive avec la profondeur.

3° Accumulation dans le sous-sol.

4° Répartition uniforme (sols non lessivés).

LEEPER relate, en outre, qu'il existe peu d'informations sur la distribution du manganèse actif et que l'on trouve, en général, les mêmes types que pour Mn total mais avec plus de contraste. Il donne deux analyses de profils où le rapport Mn actif/Mn total diminue avec la profondeur.

TOTH (S. J.) (13) étudie les sols de l'état de New-Jersey et distingue quatre types de profils pour le manganèse total :

1° Pas de variation, répartition uniforme.

2° Décroissance de A à C.

3° Augmentation de A à C.

4° Variations désordonnées.

L'auteur donne également, pour plusieurs profils, les teneurs en Mn actif, et l'examen des chiffres permet d'observer que l'hydroquinone réduit, dans certains cas, quelques unités pour cent de Mn total, alors que dans d'autres cas, elle en réduit 50 p. 100. Par ailleurs, aucune loi bien nette ne peut se dégager quant à la variation du rapport actif/total avec la profondeur.

Nous avons dosé, pour cinq profils typiques de la Bretagne et bien caractérisés du point de vue pédologique, le manganèse total en même temps qu'effectué l'analyse chimique et physique habituelle. Pour quatre d'entre eux, il s'agit des profils déjà étudiés au chapitre précédent : « Rôle de la matière organique », et choisis par G. AUBERT, pour étude par les congressistes de l'excursion « Ouest » du 6e Congrès international de la Science du Sol de Paris en 1956 (36).

1° *Podzol humo-ferrugineux sur grès et quartzites dévoniens (Saint Michel de Brasparts. Finistère). Végétation : lande à ericacées.*

Horizons	A^1	A_2 Zone cendreuse	B_1 Accumulation humique	B_2 Accumulation ferrique	C
Profondeur en cm	15-30	30-65	65-70	70-77	80-100
pH	4,1	4,15	4,0	4,35	4,75
Argile ‰	18,0	24,0	135,0	71,0	46,0
Fe_2O_3 ‰					
Fer libre (1)	**1,0**	**3,6**	**20,1**	**52,0**	**2,5**
Mn actif en p.p.m.	5,4	2,1	0,7	1,5	4,5
Mn total en p.p.m.	**24,0**	**22,2**	**46,5**	**134,0**	**138,0**

(1) Méthode à l'hydrosulfite de sodium (37).

Comme on peut le constater, il s'agit d'un podzol humo-ferrugineux, sous lande à ajoncs et bruyères, qui peut être considéré comme l'un des plus typiques de France. Le fer libre accuse une accumulation très importante en B_2, alors que le manganèse actif n'indique rien de net. Le manganèse total, par contre, accuse un lessivage important en A_2, puis une accumulation en B_2, se poursuivant à des profondeurs plus grandes que dans le cas du fer.

2° *Sol podzolique sur granite (Huelgoat. Finistère). Végétation : forêt de pins*

Horizons	A_1	A_2	B	C
Profondeur en cm	3-12	12-20	20-30	30-50
pH	4,2	4,3	4,5	4,7
Argile ‰	97,0	63,0	111,0	47,0
Fer libre	**11,6**	**25,9**	**42,1**	**29,4**
Mn actif	4,7	3,1	2,0	2,6
Mn total	**64,0**	**55,0**	**106,0**	**205,0**

On peut faire ici la même remarque concernant Mn actif et Mn total. Ce profil montre un horizon d'accumulation très net en B, caractérisé par un lessivage important de l'argile, du fer libre et du manganèse total.

3° *Sol podzolique sur schistes durs dévoniens. (Huelgoat. Finistère). Végétation : forêt mixte mais feuillus dominants (chênes).*

Horizons	A_2	B_1	B_2	B_3	B_C	C
Profondeur	3-14	14-18	18-30	30-50	50-85	85-100
pH	4,1	4,35	4,8	5,25	5,4	5,1
Argile ‰	215,0	256,0	225,0	200,0	177,5	80,0
Fer libre	**11,5**	**58,3**	**62,5**	**57,3**	**56,1**	**34,8**
Mn actif	15,2	7,3	12,0	12,3	72,0	11,0
Mn total	**78,0**	**61,0**	**173,0**	**575,0**	**1 020,0**	**250,0**

Les chiffres n'indiquent qu'un faible lessivage de l'argile, l'accumulation ferrique est marquée de B_1 à B_c, tandis que, pour le manganèse, elle l'est de B_3 à B_c. Ici, Mn actif donne des indications pédologiques plus intéressantes mais, ceci tient au fait que Mn total est beaucoup plus élevé que dans les profils précédents.

4° *Sol brun sur schistes carbonifères (Pleyben Finistère). Végétation : Bordure de champ sous châtaigniers, chênes, fougères, ajoncs.*

Horizons	A_1	A_2	A_3	C
Profondeur	0-20	20-35	35-50	50-65
pH	5,7	5,0	4,65	4,5
Argile ‰	173,0	174,0	154,0	145,0
Fer libre	**50,3**	**45,8**	**38,5**	**27,6**
Mn actif	68,5	34,0	58,5	23,1
Mn total	**1 000,0**	**1 066,0**	**900,0**	**553,0**

L'absence de lessivage est confirmé par les trois éléments : manganèse total, fer libre et argile. Le manganèse actif donne, ici encore, des chiffres sans grande signification.

5° *Phase cultivée d'un sol podzolique jeune (Kerfeunteun. Finistère) sur granulite.*

Horizons	Al couche labourée	A_2	B_1	B_2	C_1	C_2	C_4
Profondeur	0-25	35-45	45-55	55-65	75-90	90-120	150-175
pH	6,65	6,1	4,95	4,7	4,4	4,35	4,3
Argile ‰	167,0	165,0	225,0	175,0	95,0	107,0	77,0
Fer libre	**32,2**	**30,5**	**42,5**	**51,4**	**39,2**	**34,6**	**28,0**
Mn actif	26,3	44,1	88,3	66,6	38,7	41,8	40,3
Mn total	**505,0**	**729,0**	**558,0**	**387,0**	**248,0**	**267,0**	**194,0**
$\frac{\text{Mn actif}}{\text{Mn total}} \times 100$	5,2	6,0	15,8	17,2	15,6	15,6	20,7

Nous observons ici, en B_1 et B_2, un horizon d'accumulation situé sous la couche labourée et bien marqué par le fer libre. Le manganèse total semble également avoir été lessivé en B_1 et B_2, mais la couche labourée Al a certainement été enrichie par la culture (scories de déphosphoration, boues de ville, etc.). Le rapport Mn actif sur Mn total montre bien l'influence du pH sur Mn actif. Dans les horizons superficiels, Al et A_2, soumis à l'influence des chaulages, où le pH est supérieur à 6, le rapport est de 5,2 et 6,0, tandis qu'en profondeur, il est de l'ordre de 15. Voici ce que nous pouvons conclure :

Le dosage du manganèse total est un bon moyen d'investigation en pédologie, il varie dans le même sens que le fer libre, mais il semble toutefois migrer à une profondeur supérieure et ceci confirme les expériences

de BETREMIEUX (34), qui a démontré la plus grande mobilité du manganèse par rapport au fer.

Le dosage du manganèse actif (réduit à froid par l'hydroquinone en présence d'acétate d'ammonium) ne donne pas d'indications utiles en pédologie. Le pourcentage de cette forme de Mn par rapport à Mn total est très faible (fréquemment 2 à 6 p. 100), donc son dosage devient délicat dans le cas des sols pauvres, d'autant plus que les diverses extractions d'une même prise d'essai ne sont pas toujours reproductibles. De plus, les chiffres obtenus ne sont pas proportionnels à ceux de Mn total, étant donné qu'interviennent des facteurs tels que : quantité de matières organiques, pH, nature même des oxydes de manganèse présents. Il nous est dès lors possible de concevoir le mécanisme suivant pour expliquer la migration du manganèse dans les sols lessivés et podzoliques. En présence d'un humus très acide, le pH des horizons A_0 est de l'ordre de 4, et grâce à une humidité convenable, une petite fraction des oxydes manganiques est réduite en Mn^{++} soluble dans les solutions du sol et susceptible de donner des complexes pseudosolubles avec certaines substances organiques (polyacides, acides-alcools). Arrivé à une certaine profondeur, ce Mn^{++} va enrichir la zone considérée et se transformer en oxydes supérieurs, puisque nous avons vu la possibilité de cette transformation, par oxydation, jusqu'à des pH très faibles de l'ordre de 4,5 (chapitre « Destin du Sulfate manganeux ajouté aux sols »). Le pH des horizons B est, généralement, compris entre 4,5 et 5,0 pour les roches acides de Bretagne. Si les bactéries sont habituellement mises en cause dans l'oxydation biologique de Mn dans les sols neutres ou peu acides, BROMFIELD et SKERMAN (38) ont montré que certains champignons pouvaient également jouer ce rôle dans le cas de sols très acides.

II. — RELATIONS ENTRE LE MANGANÈSE DU SOL ET LE MANGANÈSE ABSORBÉ PAR LES PLANTES

A. — CAS D'UN SOL PLUS OU MOINS ENRICHI EN SELS DE MANGANÈSE, LE pH RESTANT SENSIBLEMENT CONSTANT

Dispositif expérimental.

Cet essai, mis en place en 1949 par Y. COÏC pour les 4 premières parcelles, a été, par la suite, continué par nous.

Au champ d'expérience de la Station agronomique de Quimper, une bande de terre de 5 m de largeur sur 28 m de longueur a été utilisée à cet effet. Il s'agit d'un sol de versant granulitique, peu profond, la profondeur

va d'ailleurs en croissant de la parcelle 1 (Témoin) à la parcelle 7 (plus forte dose). Consulter le schéma ci-dessous :

	1 (témoin)	2	3	4	5	6	7
Quantités de $SO_4Mn\ 1\ H_2O$ ajoutées en kg par hectare	0 kg	50 kg	100 kg	300 kg	1000 kg	2000 kg	5000 kg

La bande est orientée Est-Ouest, perpendiculairement à la pente; des apports de calcaire, effectués depuis un certain temps, avaient amené le pH légèrement au-dessus de 6 au début de l'expérience (1949).

Voici, d'ailleurs, les pH enregistrés pendant l'expérience :

	1	2	3	4	5	6	7
1952	6,2	6,15	6,2	6,2	6,1	6,1	5,9
1954	6,05	5,95	5,9	5,95	5,85	5,85	5,8

Aucun amendement calcaire n'a été apporté de 1949 à 1955. Le sol, bien enrichi en P_2O^5 et K_2O assimilables, a reçu pendant ces six années deux fois des scories Thomas, soit l'équivalent de 600 kg/ha, trois fois du Superphosphate (1 200 kg/ha au total) et des doses modérées de chlorure de potasse ainsi que d'engrais azotés nitriques.

Le manganèse dans le sol.

Chaque année, en octobre, on a dosé le manganèse échangeable et le manganèse réductible dans la couche arable (0 à 20 cm). Le prélèvement de sol, effectué courant octobre, était séché à l'air immédiatement et analysé 1 mois à 2 mois plus tard. Les résultats sont consignés dans le tableau VI.

On peut remarquer une concordance assez bonne d'une année à l'autre, dans le cas du manganèse réductible. Les chiffres plus élevés, observés en 1951 pour les parcelles 5 et 6, proviennent du fait que les dosages ont été faits seulement quelques mois après les enfouissements de sulfate de manganèse et qu'à ce moment-là, le mélange n'était pas intime avec la terre. Le manganèse échangeable donne des chiffres allant dans le sens du manganèse réductible mais il existe de nombreuses irrégularités avec des variations importantes, qu'il est difficile d'expliquer.

Le manganèse dans les végétaux.

Chaque année de 1949 à 1955, une céréale était cultivée, au moins sur la moitié de chaque parcelle. Nous avons signalé, plus haut, le gradient de fertilité croissante de la parcelle 1 à la parcelle 7, par suite d'un accroissement de la profondeur de la couche arable ; ce fait ne nous permettra pas de tirer des conclusions, quant aux rendements, d'autant plus qu'il n'y a pas de répétitions.

Dans le cas de la parcelle 1 et pour l'avoine de printemps (variété Multigrap), on a observé de nets symptômes de carence en manganèse ;

dans la parcelle 2, des symptômes moins graves sont également observés. En 1951, et pour les parcelles 5 et 6 venant de recevoir leur dose de sulfate de manganèse, on a constaté un rougissement de la première feuille

TABLEAU VI

Manganèse échangeable et réductible des parcelles d'expérience en p.p.m. de terre sèche

Quantités de Sulfate de Manganèse ajoutées en Kg / Ha	N° des Parcelles 1	2	3	4	5	6	7
	Témoin	+ 50	+ 100 (en Mars 49)	+ 300	+ 1000 (en Fév. 51)	+ 2000	+ 5000 en Nov. 51
Année 1950							
Mn éch.	-	-	-	-			
Mn réd.	20	24	30	48			
Année 1951							
Mn éch.	0,56	1,36	0,4	0,86	2,42	4,68	
Mn réd.	17	19	27	50	158	313	
Année 1952							
Mn éch.	0,6	0,5	0,5	0,56	1,04	0,92	3
Mn réd.	23	17	23	49	97,5	222	450
Année 1953							
Mn éch.	0,6	0,5	1,2	0,54	1,6	1,36	2,36
Mn réd.	17	15	20,5	45	127	192	424
Année 1954							
Mn éch.	0,9	0,5	0,66	0,5	1,15	1	2,8
Mn réd.	21	21	22	47	91	213	488
Année 1955				Non dosé			
Mn total	325	325	350	400	500	650	1100

au stade 2-3 feuilles, ce qui indique un début de toxicité, la teneur de la plante entière au 15 mai 1951 étant très élevée (925 p. p. m. de Mn/M. S.). Pour la parcelle 7, ayant reçu 5 000 kg/ha de sulfate de manganèse en novembre 51, on a observé, en février, des extrémités de feuilles nécrosées. La teneur de la plante entière pour cette avoine d'hiver était élevée le 2 mai 1952 (1er P.) soit 471 p. p. m.

L'examen du tableau VII nous montre, que la teneur de la plante entière de céréale carencée, au stade du tallage, est, généralement, inférieure à 30 p. p. m. (parcelle nº 1), la teneur à partir de laquelle on enregistre des symptômes de toxicité, étant de l'ordre de 500 p. p. m. (0,5 p. 1 000) (voir plus loin le chapitre « Toxicité des sels manganeux »). La teneur des pailles à la récolte, mise à part l'année 1949 où l'influence de l'enfouissement récent de SO_4Mn se fait sentir, est, généralement, inférieure à 25 p. p. m. Les teneurs les plus fortes enregistrées pour les parcelles à

TABLEAU VII

Teneur en manganèse des récoltes

N° des parcelles		1	2	3	4	5	6	7
1949 Avoine Ligowo	(P.	35	57	61	79			
	(G.	44	45	52	56			
1950 Blé de printemps Fylgia	(P.	16,7	16,8	22,0	26,3			
	(G.	30,5	34,3	40,0	42,0			
1951 Avoine Multigrap	(1è P.	13	41	50,4	52	373	925	
	(P.	26,2	22,4	36,2	31,5	107	314	
	(G.	28,3	34,8	40,2	40,7	77	131	
1952 Avoine d' hiver Prieuré	(1è P.	20	20,6	36	31	101	107	471
	(P.	20,5	16,5	30,5	30	65	77	154
	(G.	39	54	44	50	68	70	101
1953 Avoine Multigrap	(1è P.	13,2	16,5	17,3	27	59	69,2	176
	(P.	21	25	31	29,3	40	95	86,8
	(G.	28,7	28,8	33,5	34	43	50,5	54
1954 Blé Cappelle	(1è P.	30,3	34,4	48	58	100	80	193
	(P.	11	10,5	19,8	11,4	20,7		62,5
	(G.	27,7		29,7	26,4	32,2	36,6	40,6
1955 Avoine Multigrap	(1è P.	38,2		49	47,4	120	131	206
	(P.	14,7		24,8	53	60	92	100
	(G.	34	35	38,6	43	43	59	66

P. = paille G. = grain 1èP. = prélèvement au moment du tallage

symptômes de toxicité après la levée s'élevant à 300 p. p. m. Les grains, par contre, présentent une constance très grande dans leur teneur en manganèse et les chiffres s'écartent exceptionnellement de la zone 30-50 p. p. m., qu'il s'agisse de blé ou qu'il s'agisse d'avoine. Consulter le tableau VII.

Autres plantes que les céréales. — En 1951 et 1952, la céréale n'occupait que la moitié de la bande d'essai, l'autre moitié étant réservée, respectivement, pour une pomme de terre et un petit pois. Ce dispositif a permis la comparaison des teneurs en Mn de la matière sèche de l'avoine avec celle de ces deux plantes, dans des conditions de sol assez rigoureusement identiques. Nous avons adjoint, dans le tableau ci-dessous, les

teneurs en manganèse d'une plante adventice, le Senecio vulgaris, pour 3 parcelles de teneurs très différentes en « Mn réductible ».

	N° des parcelles					
	1	2	3	4	5	6
1951						
Avoine Multigrap (tallage)	13 p.p.m.	41 p.p.m.	50,4 p.p.m.	52 p.p.m.	373 p.p.m.	925 p.p.m.
Pomme de terre (feuilles en juin)	48	51	58	65	257	536
Senecio vulgaris (plante entière à la floraison)	49			63		121
1952						
Avoine d'hiver (Prieuré) 2 mai	20	20,6	36	31	111	107
Pois, plante entière le 10 mai	49,5	50	46,6	50,8	60,8	84,4

Ces quelques comparaisons nous permettent de penser que les céréales ont une plasticité chimique, vis-à-vis du manganèse, plus grande que celle de plantes d'autres familles botaniques et que leur teneur en manganèse suit plus étroitement les variations de l'élément dans le sol.

Discussion.

Les graphiques III, IV, V, et VI illustrent les deux précédents tableaux ; sur les trois premiers, on a porté, pour chaque année d'expérimentation, la teneur en Mn de la matière sèche en fonction des parcelles donc des teneurs en manganèse facilement réductible. Le graphique III indique les teneurs pour les grains (avoine de printemps, avoine d'hiver, blé de printemps ou blé d'hiver) ; l'année 1949 (1re année d'essai) est certainement faussée par excès, le sulfate de manganèse ayant été enfoui immédiatement avant le semis de l'avoine (le 9 mars 1949) ; il est à remarquer, également, qu'au cours des années 1951-53 et 55, il a été cultivé la même variété d'avoine de printemps : Multigrap. Le graphique IV nous montre la plasticité chimique beaucoup plus importante des pailles de céréales au moment de la récolte ; l'année 1949 apparaît aussi, nettement faussée par excès ; l'année 1954 est la seule année de culture de blé d'hiver. Il faut remarquer, en outre, que nous avons éliminé des graphiques, les résultats des parcelles 5 et 6 en 1951 et 7 en 1952, à cause de la proximité des enfouissements de sulfate de manganèse. Le graphique V, enfin, trace les variations des teneurs de la matière sèche des plantes entières au moment du tallage (au stade 5-6 feuilles soit début mai pour les avoines de printemps) ; c'est ici qu'apparaît le mieux le reflet de l'alimentation manganèsifère en fonction des teneurs du sol en cet élément. L'analyse de la jeune plante de céréale, avant la montaison, sera donc très intéressante

pour définir l'alimentation en manganèse ; c'est, à ce stade, qu'apparaissent d'ailleurs les premiers symptômes de carence et que se situe la « période critique » telle qu'elle a été définie par Y. Coic (2). Enfin, c'est à cette époque qu'il est nécessaire de pulvériser la céréale avec une solution de sulfate de manganèse pour lui permettre d'accomplir normalement ses phases ultérieures de développement.

Sur le graphique VI, nous avons mis en comparaison le manganèse réductible (moyenne des dosages de 5 années), puis la teneur en Mn de la matière sèche, soit au moment du 1er prélèvement (1er P.), soit dans les pailles à la récolte (P.) (moyennes de 5 ou de 7 années). En ordonnées, on a porté non plus Mn en p. p. m., mais les indices de comparaison, en égalant à l'unité les teneurs de la parcelle n° 1. Pour les 5 premières parcelles on observe une très bonne analogie entre les courbes de Mn réductible et de Mn au 1er P., le manganèse réductible des parcelles 6 et 7 augmentant beaucoup plus vite que la richesse de la plante. Les courbes (1er P.) et (P.) sont d'ailleurs très semblables. Nous avons porté en pointillé, sur ce même graphique, les chiffres supposés valables de manganèse échangeable. De la parcelle 1 à la parcelle 4, il n'est pas possible de mettre en évidence une différence, alors que dans le cas de la parcelle 7, l'indice passe à 5. Il est à noter que le manganèse total passe, dans ces conditions, à l'indice 2 pour la parcelle 6 et à l'indice 3,4 pour la parcelle 7. Comme nous pouvons considérer le pH équivalent pour toutes ces parcelles, les différences d'alimentation proviennent donc d'abord du manganèse total.

Conclusions.

1° Les teneurs en manganèse des céréales en herbe suivent très étroitement les teneurs en manganèse réductible à l'hydroquinone du sol correspondant, pour des teneurs de ce dernier allant jusqu'à 100 p. p. m. de sol séché à l'air (parcelle 5 sur le graphique VI). Cette zone comprend les sols carencés, moins de 25 p. p. m., puis la plupart des sols normaux habituellement cultivés dont le pH est compris entre 6 et 7. Au-dessus de ces teneurs (parcelles 6 et 7), les indications de Mn réductible sont exagérées. La courbe des teneurs en Mn des pailles à la récolte a une allure analogue, mais qui n'accuse cependant pas, aussi fortement, les très fortes doses de Mn dans le sol.

2° Le manganèse échangeable donne, pour les sols les plus riches (parcelles 5-6-7), des variations analogues aux variations de teneur des pailles à la récolte, mais pour les sols pauvres (voir tableau VI), il est impossible d'effectuer cette détermination avec précision. Des variations importantes se produisent d'une année à l'autre, ainsi qu'avec le temps de conservation des échantilllons secs. On ne peut donc pas compter sur ces déterminations, sauf peut-être, pour les sols non carencés, où il est

supérieur à 1 p.p. m. En général, Mn échangeable permet de déceler les carences, s'il est nettement inférieur à 1, mais il y a incertitude aux environs de 1, il faut compléter par la détermination du pH et du Mn réductible.

3° On remarquera que le Manganèse total (pour un même pH et pour des variations importantes), donne également des indications en rapport avec l'alimentation en manganèse de la plante.

B. — CAS D'UN SOL ACIDE PLUS OU MOINS NEUTRALISÉ VARIATIONS DU PH ET DU MANGANÈSE RÉDUCTIBLE

Il s'agit d'un essai, effectué en vases de végétation, dans le but de reproduire expérimentalement une carence en manganèse par chaulage d'une terre acide. Trois groupes de 4 pots ont ainsi été constitués :

1er groupe, Terre acide témoin — (T) — pH 4,73 ;
Mn échangeable 4,05.
Mn réductible 15,17.

2e groupe, une dose de CO_3Ca — (1B) — pH 6,13 ;
Mn échangeable 0,85.
Mn réductible 10,10.

3e groupe, deux doses de CO_3Ca — (2 B) — pH 7,12 ;
Mn échangeable 0,95.
Mn réductible 6,62.

Ces derniers chiffres représentent les moyennes des analyses de sols effectuées chaque année, pendant 4 ans, sur les mêmes pots. Des détails seront donnés à ce sujet au chapitre suivant : C :Reproduction expérimentale de la carence en manganèse.

Nous avons ici deux variables, le pH d'une part, le manganèse échangeable et facilement réductible d'autre part. Les variations dans les quantités de Mn extraites dans ces conditions sont, d'ailleurs, une conséquence directe des variations de pH. Nous renvoyons à ce propos à la première partie du mémoire : « 6. — Action du pH du sol sur le manganèse facilement réductible. »

		Mn en p.p.m. de M. S.	
		Paille	Grains
1951	T	192	90
	1 B	69,4	46
	2 B	43,6	40
1952	T	45,7	50,5
	1 B	16,0	40,9
	2 B	13,6	36,7
1953	T	146	60,3
	1 B	12	14
	2 B	10,3	7,7

Pendant 3 années, il a été cultivé de l'avoine dans ces groupes de pots et le manganèse a été dosé dans la matière chèche des pailles et des grains à la récolte. Voilà les résultats (voir tableau précédent).

On remarquera sur ce tableau, les teneurs très voisines pour 1 B et 2 B (sols chaulés), et la teneur beaucoup plus forte des avoines ayant poussés sur le sol resté acide (T). Les conclusions essentielles à tirer de ces essais sont celles-ci :

1° Dans la zone de pH 6-7, l'influence de celui-ci est très faible, les teneurs en 2 B étant seulement légèrement inférieures à celles de 1 B. Le manganèse réductible subit, dans cette zone, une diminution de 30 p. 100 environ, lorsque le pH varie de 6,1 à 7,1, mais il n'est pas possible de mettre en évidence une variation nette de manganèse échangeable.

2° Dans la zone de pH 5-6, l'influence de ce dernier est importante puisque, pour une même différence de manganèse réductible que ci-dessus, la teneur des plantes augmente beaucoup plus (1 B en comparaison avec T). Au pH très acide du Témoin (4,73), le manganèse échangeable a une valeur 4 fois plus forte, environ, que dans la série à pH 6,13.

L'indication de Mn échangeable est valable si l'on compare T et 1 B mais c'est celle de Mn réductible qui est valable si l'on compare 1 B et 2 B. Mn échangeable est incertain lorsqu'il est voisin de 1 p. p. m. (pH supérieur à 6), c'est-à-dire dans la zone carencée ; il devient plus indicatif pour des valeurs supérieures, c'est-à-dire en sols acides et très acides de pH inférieur à 6.

C. — REPRODUCTION EXPÉRIMENTALE DU PHÉNOMÈNE DE CARENCE EN MANGANÈSE EN POTS DE VÉGÉTATION

Ce phénomène, fréquent en Basse-Bretagne, survient après les apports d'amendements calcaires aux sols originellement acides. Il s'agit de sols formés sur granites, granulites ou schistes primaires, très acides et riches en matières organiques, de type « Humus brut « ou « Mor », au moment de la mise en culture (type pédologique : sol brun acide ou sol podzolique). Quelques années après un apport de calcaire ou de chaux, dès que le pH s'élève au-delà de 6, des carences en manganèse graves peuvent apparaître sur céréales et accessoirement sur d'autres plantes.

Nous avons voulu reproduire ce phénomène expérimentalement, en pots de végétation, de manière à le suivre de plus près.

Protocole expérimental.

La terre, provenant d'une lande de région granulitique, a été répartie dans 12 pots contenant chacun 9 kg de terre sèche, soit 11 kg de terre humide. Il s'agit de vases de végétation, non drainés, système Burgevin

en tôle galvanisée avec un système d'arrosage par le fond : diamètre 25 cm, hauteur 26 cm. Quatre des 12 pots ont servi de témoins non chaulés, quatre reçurent 46,5 g chacun de carbonate de calcium pur, les quatre derniers reçurent 93 g chacun de carbonate de calcium. Ces quantités de CO_3Ca correspondent à la valeur du besoin en chaux d'après la méthode KAPPEN (acidité hydrolytique), série 1 B, ou à deux fois cette valeur, série 2 B.

Ces pots préparés le 9 mars 1951, ont été ensemencés en avoine le 19 mars 1951. Après la récolte, qui a eu lieu fin juillet, les vases sont conservés pendant l'hiver, en évitant la dessiccation de la terre, puis réensemencés à nouveau au mois de mars suivant. Chaque année, on a ajouté, par pot, comme mélange fertilisant N. P. K. : 1,25 g de Nitrate de chaux, 1,5 g de phosphate bicalcique et 1 g de Sulfate de potasse. La variété d'avoine de printemps choisie a été Multigrap, car cette variété s'est révélée, dans nos essais, la plus sensible à la carence en manganèse.

Résultats enregistrés.

Nous rappellerons, d'abord, la composition moyenne des trois séries de sols. Au Chapitre B (Partie I) — Manganèse actif — 6. — Action du pH du sol sur Mn réductible, nous avions donné, chaque année, pendant 4 années consécutives, le résultat des mesures de pH et de Manganèse, voici les moyennes :

Série T N° des pots : 9-10-11-12 ; pH 4,73 ; Mn éch. 4,05 ; Mn réd. 17,17.
Série 1B N° des pots : 13-14-15-16 ; pH 6,13 ; Mn éch. 0,85 ; Mn réd. 10,10.
Série 2B N° des pots : 17-18-19-20 ; pH 7,12 ; Mn éch. 0,95 ; Mn réd. 6,62.

Poids des récoltes.

		M. S. produite en g par pot	
		Paille	Grains
1re année, 1951	T	19,5	22,9
	1 B	24,2	25,0
	2 B	30,0	31,5
2e année, 1952	T	19,7	16,8
	1 B	30,3	26,9
	2 B	40,3	34,1
3e année, 1953	T	5,0	0,6
	1 B	15,0	12,3
	2 B	17,0	4,8
4e année, 1954	T	0	0
	1 B	0	0
	2 B	0	0

Discussion des résultats.

1re *année* 1951. — Les pesées de la paille et du grain récoltés montrent une très nette action bénéfique du chaulage par rapport aux pots restés acides. La double dose de calcaire donnant une différence encore

plus forte, entre cette dose et la simple dose, pour la paille et le grain.

2e *année* 1952. — Les pots Témoins donnent un rendement encore plus faible par rapport aux pots chaulés, ce phénomène va d'ailleurs s'accuser au cours des 3e et 4e années d'expérience, conséquence de la répétition des cultures d'avoines en pots non drainés et sur terre très acide. Nous n'avons pas cherché à déterminer les causes exactes de cette stérilité, car il s'agit bien d'une véritable stérilisation dès la 3e année de culture.

Début mai, nous avons observé quelques symptômes de carence en manganèse dans la Série 2 B, au stade 4-5 feuilles ; c'est ainsi que 3 pieds d'avoine étaient atteints dans le pot nº 18, 4 pieds dans le pot nº 19, 5 pieds dans le pot nº 20. D'autre part, de fin mai à la montaison, les plantes de la série 2 B présentent un port affaissé caractéristique de la déficience en manganèse (voir photo nº 3), bien qu'elles soient plus vertes, avec des feuilles plus larges. L'action de la double dose de calcaire, assurant de meilleures conditions de nutrition (azotée en particulier), vient compenser la déficience manganique et finalement donner un poids de paille et de grain supérieur.

3e *année* 1953. — Début mai, tous les pots chaulés (nº 13 à 20) présentent des symptômes de carence mais cette carence s'aggrave dans la série 2 B (voir photo au 12 juin 1953, nº 5) et, au contraire, s'atténue dans la série 1 B. Les poids de grain récolté dénotent une carence très grave en 2 B et seulement moyenne en 1 B. Le poids de paille très légèrement supérieur s'explique par le fait que la carence en manganèse produit un abondant développement de jeunes talles ne portant pas d'épis.

4e *année* 1954. — Au début de mai, nous avons à nouveau des symptômes de carence dans les huit pots chaulés. La photo prise le 2 juin 1954 montre que la série 1 B (pots nº 13 et 14) est légèrement supérieure mais la carence va s'aggraver dans tous les pots pour finalement ne donner aucune récolte (voir la photo du 6 juillet 1954, nº 8).

En résumé, nous pouvons dire qu'après 8 mois de chaulage (époque de la 1re analyse des sols), les conditions de pH et de Mn réductible requises pour l'apparition de la carence sur avoine sont réalisées. Le semis d'avoine ayant été réalisé, cette première année d'essai (1951), presque aussitôt après l'incorporation du Carbonate de chaux, l'effet de l'élévation de pH, qui s'est poursuivi progressivement au cours de la période végétative, n'a pu être important. C'est seulement après 1 an de chaulage que les premiers symptômes de carence ont été visibles et après 2 ans de chaulage que la carence a été grave, ceci dans le cas de la série 2 B, pH légèrement supérieur à 7. Pour les sols amenés à pH 6,1, série 1 B, les premiers symptômes sont apparus après 2 ans de chaulage et la carence grave après 3 ans.

Photos N° 1 à 8 — Reproduction expérimentale de la carence en manganèse

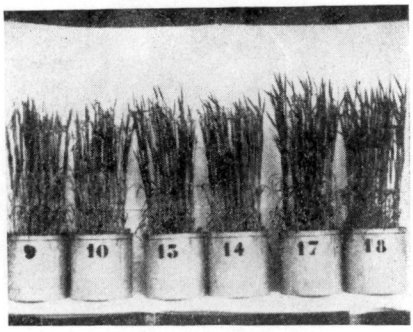


Photo 1. — 12 Juin 1951

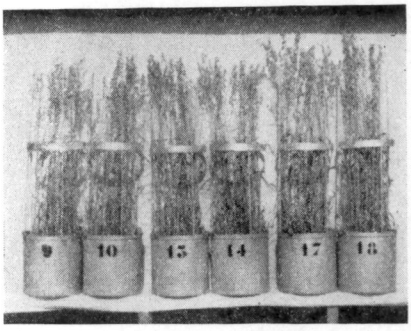


Photo 2. — 17 Juillet 1951

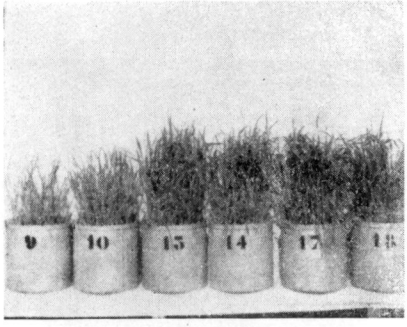


Photo 3. — 19 mai 1952

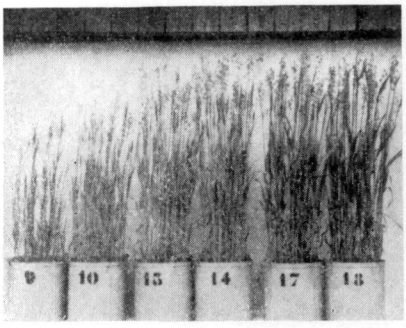


Photo 4. — 13 Juin 1952

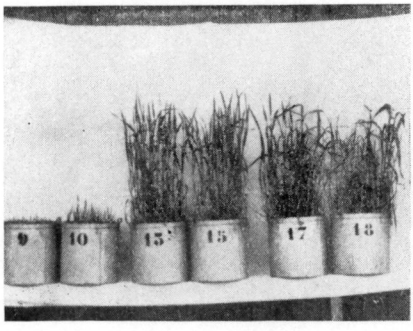


Photo 5. — 12 Juin 1953

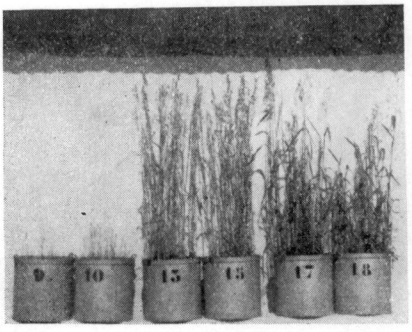


Photo 6. — 9 Juillet 1953

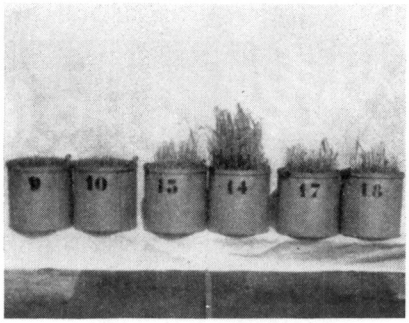


Photo 7. — 2 Juin 1954

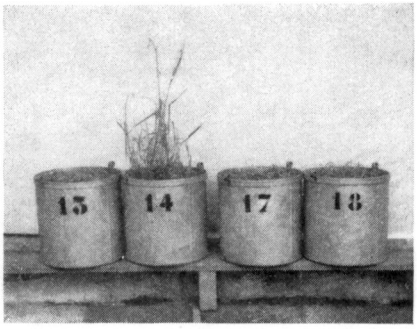


Photo 8. — 6 Juillet 1954

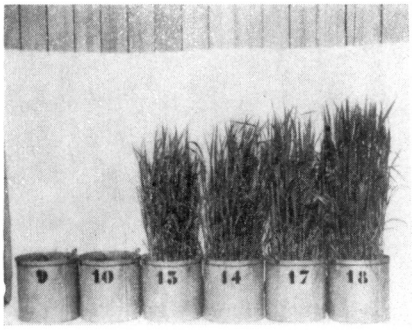


Photo 9. — 10 Juin 1955

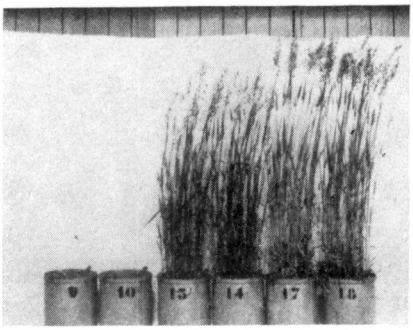


Photo 10. — 4 Juillet 1955

Guérison de la carence en manganèse par réacidification du sol à la fleur de sonfre.

N°s 9 et 10 — Pots témoins, acides.

N°s 13 et 14. — Pots ayant reçu une dose de calcaire.

N°s 17 et 18. — Pots ayant reçu deux doses de calcaire.

Suppression de la carence par réacidification du sol à la fleur de soufre et retour à la fertilité.

L'expérience des cultures en vases de végétation nous a montré qu'un sol carencé en manganèse donnera, pendant de longues années, des récoltes carencées si aucun changement n'intervient. Les 8 pots chaulés et n'ayant donné aucune récolte d'avoine, au cours de la 4e année d'expérience, ont été ensemencés l'année suivante, en 1955, après addition au sol de fleur de soufre. En octobre 1954, il a été incorporé, à la terre, une quantité de soufre en fleur supposée capable de ramener le pH à sa valeur initiale ; c'est ainsi que 7,5 g par pot ont été ajoutés à la série 1 B et 15 g à la série 2 B.

L'avoine, semée dans ces pots fin mars, a donné lieu à une végétation normale, puis à un poids total récolté par pot de :

Série 1 B — 75 g (Paille + grain).

Série 2 B — 110 g (Paille + grain).

Voir les photos nos 9 et 10.

L'analyse des sols après la récolte était la suivante :

	pH	Mn échangeable	Mn réductible
	—	—	—
Série 1 B....	5, 2	3 p. p. m.	13 p. p. m.
Série 2 B....	5,55	2 p. p. m.	14 p. p. m.

Les chiffres de manganèse sont donc, sensiblement, revenus à leur niveau initial. Le pH plus faible en 1 B explique la récolte plus faible. Il semble que le pH aurait dû être amené à une valeur comprise entre 5,5 et 6, puisqu'au-dessous de 5,5 l'acidité est gênante et qu'au-dessus de 6, il y a déficience en manganèse.

D. — FIXATION DES SEUILS DE CARENCE

1° Manganèse dans le sol.

Nous avons déjà discuté de la validité du Manganèse dit « échangeable « pour caractériser l'aptitude d'un sol à founir cet élément aux végétaux ; résumons-nous à nouveau : le seuil peut être fixé à 1 p. p. m. de terre fine et sèche — (1/2 heure d'agitation dans l'acétate d'ammonium neutre et normal, rapport terre/solution égal à 1/10) — pour des teneurs très inférieures à 1 p. p. m. et des pH nettement supérieurs à 6, il s'agit bien de sols carencés ; au voisinage de 1 p. p. m. et pour des pH voisins de 6, il y a incertitude ; enfin, argument plus grave, les résultats ne sont pas, à coup sûr, reproductibles surtout dans les faibles teneurs. Si nous utilisons le critère « Manganèse facilement réductible », nous caractériserons, avec plus de sécurité, les sols, la connaissance du pH restant malgré

tout indispensable (1 heure d'agitation, après l'extraction de Mn échangeable, avec un acétate contenant 0,2 p. 100 d'hydroquinone, rapport terre/solution égal à 1/10). Nous avons fixé le seuil aux environs de 20 p. p. m. de Mn pour les sols de pH au moins égal à 6,2 et pour une profondeur de couche arable de 20 cm environ. Cette dernière condition est très importante et nous permet de comprendre, combien il est souvent illusoire de vouloir présumer du rendement d'une récolte d'après l'analyse chimique, si précise soit-elle, d'un échantillon de la couche arable.

Influence de la profondeur du sol. — Il serait plus exact d'employer l'expression « profondeur de la couche chaulée ». Y. Coïc, au cours de ses études sur la carence en Manganèse des céréales, a particulièrement insisté sur l'existence d'une période critique (fin avril, début mai), au cours de laquelle la plante semble souffrir, le plus intensément, de

	N° des pots				
	1	2	3	4	5
Profondeur du sol carencé.	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm
Profondeur du sous-sol acide	20 cm	15 cm	10 cm	5 cm	0 cm
	Nombre de plantes avec symptômes de carence				
29/4/57	2	6	15	4	22
7/5/57	15	22	21	25	25
24/5/57	0	5	25	25	25
Récolte					
25/7/57 : poids de la botte	68 g	69 g			
poids du grain ..	4,8 g	7,1 g			
19/9/57 : poids de la botte			15 g	18 g	22 g
poids du grain ..			0	0	0

cette malnutrition (2). Plusieurs facteurs peuvent intervenir pour faire cesser cette période, dans le cas de carence moyenne ou peu grave, au nombre desquels nous citerons : modification dans les phénomènes microbiens qui régissent la dynamique du Manganèse dans le sol, variation du stade végétatif et de la physiologie de la plante, extension du système radiculaire et arrivée des racines dans une zone du sol plus acide, donc plus apte à fournir du Manganèse. Les apports de calcaire, ayant déclenché la déficience manganique, ont élevé le pH au-dessus de 6 sur une profondeur variant essentiellement avec celle des labours. On a voulu préciser l'importance de la profondeur de la couche chaulée sur la gravité de la carence en superposant, dans des pots de végétation, une terre carencée de pH 6,8 à un sous-sol acide de pH 6,3 riche en Manganèse actif. Il s'agit de pots de 30 cm de hauteur, contenant environ 25 kg de terre et non drainés. L'avoine a été semée le 29-3-57 à raison de 25 plantes par pot. Les résultats sont donnés dans le tableau ci-dessus.

Les photos nos 11 et 12, prises les 14-5-57 et 17-6-57, illustrent ce tableau.

Un mois après le semis de l'avoine, les racines sont déjà soumises à l'influence du sous-sol acide situé à 10 cm de profondeur car, à ce moment là (29-4-57), le pot 1 est moins gravement atteint que le pot 2. Le 7-5-57, la présence de 5 cm de sous-sol acide, au fond du pot n° 4, fait que les symptômes sont moins graves que dans le pot n° 5, bien que tous les pieds présentent des symptômes. A cette date et jusqu'au 15 mai, l'examen de la végétation indique une croissance de la gravité de la carence allant de 1 vers 5. L'augmentation progressive des poids récoltés, en passant du pot n° 3 au pot n° 5, peut s'expliquer par l'accroissement de la proportion de terre carencée qui, provenant d'un sol, est plus riche en éléments fertilisants que le sous-sol. Si l'épaisseur de la couche chaulée est inférieure à

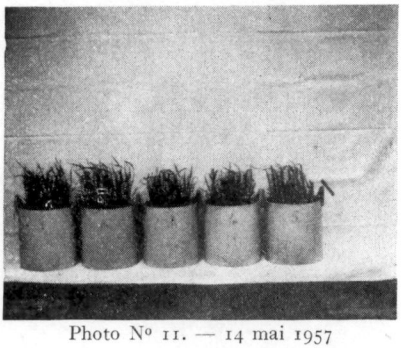


Photo N° 11. — 14 mai 1957

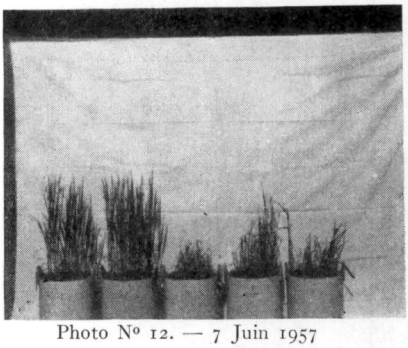


Photo N° 12. — 7 Juin 1957

Influence de la profondeur de la couche chaulée et carencée. Pot 1 : 10 cms. — Pot 2 : 15 cms. — Pot 3 : 20 cms. — Pot 4 : 25 cms. — Pot 5 : 30 cms.

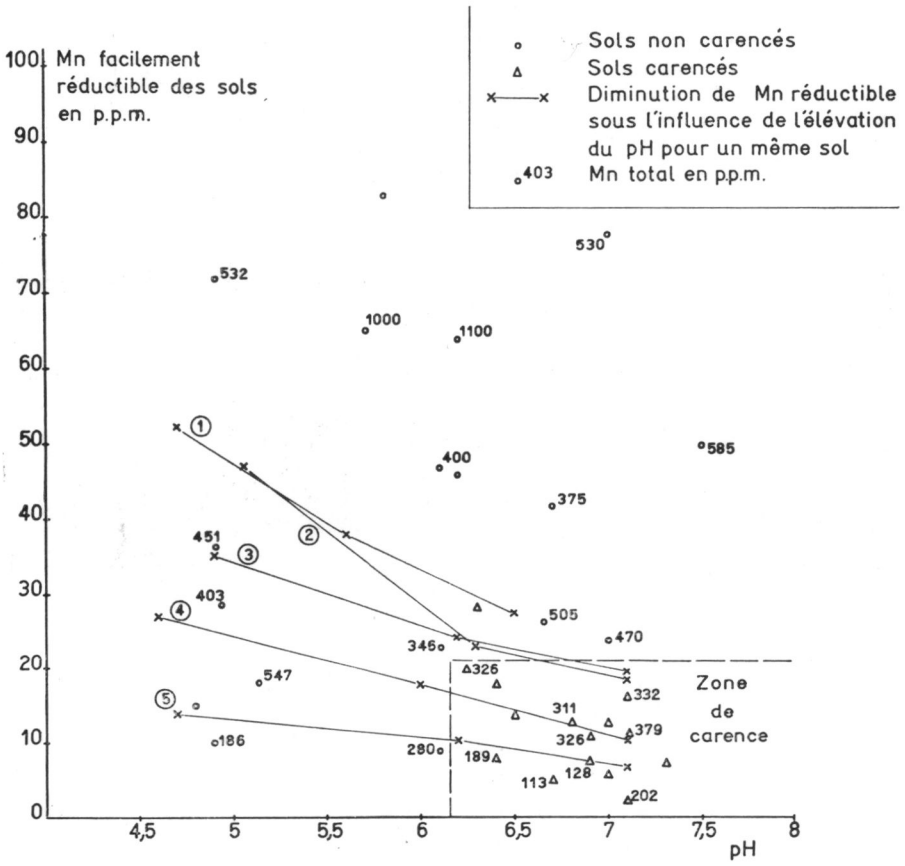
20 cm, l'avoine est donc capable de se ressaisir à partir du 20 mai et de donner une récolte quasi normale. Les nouvelles feuilles, formées après le 15 mai dans les pots 1 et 2, ne manifestent plus de symptômes pathologiques.

Ces résultats montrent que, pour une même teneur des sols en « Manganèse actif «, la gravité de la carence dépendra de la profondeur à laquelle se trouve le sous-sol acide, d'autre part, que les normes peuvent être très différentes selon qu'il s'agit d'une culture de plein champ ou d'une culture en pot avec absence de sous-sol.

Représentation graphique. — Sur le graphique VII, nous avons porté, en fonction du pH et du « Manganèse facilement réductible », les points figuratifs de divers sols carencés ou non carencés. Le chiffre accompagnant certains points est celui du manganèse total. Ce graphique illustre, en quelque sorte, le tableau V du début de cette étude. La zone de carence est située dans le rectangle situé en bas, à droite et limité approximativement par l'ordonnée 20 p. p. m. et l'abscisse pH = 6,1. Les traits pleins matérialisent, pour 5 terres, la diminution du manganèse réductible sous

l'influence de l'élévation du pH : apport de 2 doses de chaux à un sol acide. La pente de ces différentes lignes est assez uniforme et ceci appelle les remarques suivantes :

— au-dessus d'un certain taux de Mn total, donc au-dessus d'un certain taux de Mn réductible dans la terre acide, le chaulage n'amènera jamais de déficience en manganèse, quelque soit le pH obtenu ; ce taux



Graphique 7. — Représentation graphique des sols en fonction de leur pH et de leur Mn facilement réductible.

ne serait valable, bien entendu, que pour des sols de même origine géologique ou pour des sols plus ou moins enrichis en manganèse par apports artificiels. D'après le graphique VII, on peut estimer au moins à 500 p. p. m. de Mn total le seuil à partir duquel la carence n'est pas possible par élévation du pH ; ce chiffre est un ordre de grandeur ; on voit, en effet, qu'il apparaîtrait de nombreuses exceptions, les divers sols représentés sur le graphique étant d'origines assez diverses.

— Les lignes matérialisant la chute de Mn réductible ne pénètrent dans la zone de carence que pour des pH supérieurs à 6,1, dans le cas des

sols les plus riches en Mn réductible au départ (donc les plus riches en Mn total). Les phénomènes de carence ne se produisent donc, dans ce cas, qu'à partir de pH supérieurs à 6,1. Il nous semble, en effet, que des sols de réaction supérieure à 7 puissent présenter une déficience pour des Mn réductibles très supérieurs à 20 (30 ou 40 p. p. m.), mais nous ne possédons pas suffisamment d'observations nous permettant d'étayer solidement ce fait. Il y aurait, en quelque sorte, un seuil de carence d'autant plus élevé que le pH serait lui-même plus élevé. Enfin, il faut bien voir que toutes ces normes sont valables dans les conditions culturales de la Bretagne occidentale et qu'il ne faut pas chercher à les généraliser. Dans la littérature étrangère, on trouve, cependant, des normes du même ordre de grandeur ; ainsi pour la même technique de dosage, LEEPER, cité par SHERMAN (G. D.) (40), trouve que certains sols neutres et alcalins du Michigan et d'Australie sont déficients s'ils contiennent moins de 25 p. p. m. de manganèse facilement réductible. Les sols fortement acides deviendraient, selon ces auteurs, déficients en Mn par chaulage, s'ils contiennent moins de 25 p. p. m. de Mn facilement réductible, les sols sains contenant, en général, au moins 100 p. p. m. de cette même forme de manganèse.

2° Manganèse dans les végétaux.

Y. COÏC et M. COPPENET (2) ont donné les teneurs en manganèse habituellement rencontrées en Bretagne pour différentes plantes cultivées selon qu'elles portent ou non des symptômes de carence. Pour l'avoine au stade du tallage, la plante, qui extériorise des signes bien marqués de déficience, contient de 12 à 25 p. p. m. de Mn par rapport à la matière sèche. Suivant les auteurs et suivant les régions, ces chiffres subissent des variations plus ou moins importantes. LEEPER (22), après une revue de la littérature, pense que la limite entre plantes saines et plantes malades peut être tracée à 15 p. p. m. pour l'avoine ainsi que pour les autres céréales ; SAMUEL et PIPER (41) pour l'Australie, avaient fixé cette limite à 14 p. p. m. pour l'avoine ; A. FINCK (42), pour le Schleswig-Holstein, la fixe entre 10 et 17 p. p. m., à condition que les plantes d'avoine aient moins de 45 cm de hauteur.

Toutes ces teneurs sont assez en accord avec celles trouvées en Bretagne et, si elles sont plus faibles, cela peut s'expliquer, en partie, par le fait que Y. Coïc travaillait sur des plantes plus jeunes. Nous savons, en effet, qu'au cours de la période de la montaison, la teneur en Mn de la matière sèche des céréales diminue fortement. Comme règle générale, nous pouvons admettre que lorsque les feuilles d'une plante quelconque contiennent *moins de* 20 *ou* 25 *p. p. m. de Mn* dans leur matière sèche, il y a lieu de présumer une mauvaise nutrition en cet élément. Pour les céréales, lorsque nous tombons au-dessous de cette teneur, les signes extérieurs

de carence apparaissent et il semble très difficile de mettre en évidence une zone où le rendement serait accru par apport de manganèse, en l'absence de signes de carence.

La teneur des feuilles de plantes saines peut atteindre et dépasser 100 p. p. m. Au chapitre suivant, le lecteur aura un aperçu des teneurs en Mn, dans le cas de plantes manifestant des symptômes de toxicité manganique.

Teneur en manganèse de quelques plantes fourragères. — Dans l'introduction du présent mémoire, nous avons évoqué le problème de la teneur en Mn des végétaux, en liaison avec la santé des animaux domestiques les consommant. Divers auteurs sont d'accord pour admettre que la matière sèche de la ration des bovins doit renfermer au moins 20 mg de Mn par kg (20 p. p. m.). Nous avons signalé, qu'en Bretagne, les graines et pailles de céréales provenant de sols carencés contiennent fré-

TABLEAU VIII

Teneur en manganèse des plantes fourragères en fonction des sols.

Localités Sols pauvres en Manganèse	pH	Mn actif (1)	Plante fourragère	Teneur en Mn p.p.m. de M. S.
Plogastel-Saint-Germain ..	6,9	traces	ray-grass italien	10,6
Langolen.....	terre carencée		ray-grass italien	21
			trèfle incarnat	18,4
Ergué-Armel	terre carencée		trèfle incarnat	13 et 19
Briec	6,2 carence légère		ray-grass italien	32 et 41,7
	6,2 carence légère		dactyle	33 et 44,3
	6,2 carence légère		trèfle blanc	24,6 et 28,4
Quéménéven.....	6,6	7,5 p.p.m.	dactyle	49
Sols normalement pourvus en manganèse				
Pluguffan	5,5	6,5 p.p.m.	ray-grass italien	95
			trèfle incarnat	21
Landudec	6,9	41,0	ray-grass italien	40,5 et 55
			trèfle incarnat	18,6
Plogonnec 1)	6,9	31,0	ray-grass italien	92
Plogonnec 2)	6,8	39,0	ray-grass italien	46,5
Cast 1)	7,15	46,0	ray-grass italien	53
Cast 2)	6,5	47,0	dactyle	93
Quéméneven	6,9	39,0	dactyle	69
Plomelin			dactyle	116
			ray-grass anglais	111

(1) Mn actif déterminé par la méthode BITTEL (30).

quemment moins de 20 p. p. m. de Mn. Le tableau VIII donne les teneurs en Mn de la matière sèche de diverses plantes fourragères, en fonction des teneurs en « Mn actif » des sols sur lesquels elles ont poussé.

Dans le Finistère, on cultive, sur une vaste échelle, le mélange ray-grass d'Italie-trèfle incarnat pour la production du foin. Le tableau VIII donne la teneur en manganèse des deux constituants de cette asso-

ciation pour trois cas, ainsi que la teneur de ray-grass d'Italie cultivés seuls, de quelques dactyles, d'un trèfle blanc et d'un ray-grass anglais. Les plantes ont été récoltées au moment de la floraison ou, tout au moins, après la formation des épis pour les graminées, c'est-à-dire de fin mai à début juin. Ces quelques chiffres ne permettent pas de conclure, d'une façon définitive, mais nous pouvons retenir cependant les faits suivants :

— les trèfles incarnats dépassent rarement 20 p. p. m. de Mn,

— les ray-grass d'Italie peuvent avoir des teneurs inférieures ou à peine supérieures à 20 p. p. m. dans les sols déficients,

— les ray-grass et les dactyles sur sols normalement pourvus en « Mn actif », présentent des teneurs dépassant souvent 50 p. p. m. et pouvant atteindre 100 p. p. m.

E. — LA TOXICITÉ DE L'ÉLÉMENT MANGANÈSE

Afin de guérir les sols déficients en manganèse, on est amené à utiliser des quantités de sels manganeux assez importantes, aussi, doit-on se préoccuper de la toxicité possible de ces sels vis-à-vis du végétal. Les sols bretons carencés (où le pH a été amené aux environs de 6,5) peuvent donner des récoltes normales, pendant 5 ans au moins, après enfouissement de 600 kg/ha de SO_4Mn, H_2O ; dans de tels sols, il est possible d'utiliser 10 tonnes/ha de SO_4Mn, H_2O sans apparition d'aucun phénomène de toxicité. Par contre, dans les sols bretons restés très acides, une même dose de 10 tonnes/ha stérilise complètement ceux-ci.

La littérature étrangère signale un certain nombre de cas de mauvaise croissance, en sols acides, qui semblent imputables à une toxicité du manganèse ; c'est ainsi que BERGER et GERLOFF (43) ont observé une toxicité sur pomme de terre dans le Nord du Wisconsin où le pH des sols est inférieur à 5 (1).

Nous avons provoqué, expérimentalement, des manifestations d'intoxication manganique, par incorporation de sulfate de manganèse à divers sols, soit en pots de végétation, soit en petites parcelles. L'addition de sulfate de manganèse à un sol provoquant, de plus, une acidification, nous avons déterminé le pH et le manganèse avant l'addition et plusieurs mois après l'addition. Le tableau IX, première partie, donne les caractéristiques analytiques des 7 cas étudiés se rapportant à 5 sols différents.

Après l'apport de SO_4Mn aux sols, il a été procédé à la culture de diverses plantes et les observations faites sont résumées ci-dessous.

(1) Depuis la rédaction de ce mémoire un cas de toxicité en manganèse a été observé sur pomme de terre (Variété B. F. 15) à Plœuc dans les Côtes-du-Nord. Les caractéristiques du sol étant les suivantes : pH (eau) = 4,8, Mn échangeable 4,25 p. p. m., Mn facilement réductible 128 p. p. m.

TABLEAU IX (1ère partie)

CARACTERISTIQUES DES SOLS ETUDIES

N° des cas	Avant l'apport de SO_4Mn			Quantités apportées / Ha environ	Après l'apport de SO_4Mn		
	pH	Mn échangeable	Mn réductible		pH	Mn échangeable	Mn réductible
1	7	0,4 p.p.m.	6 p.p.m.	5 tonnes	6,55	4,8 p.p.m.	284 p.p.m.
2	7	0,4	6	10	6,2	30	576
3	6,2	1,0	46	5	5,9	3	450
4	6,5	0,8	40	10	5,05	11	515
5	5	4,0	25	2,5	4,85	30	122
6	4,9	6,0	72	5	4,6	300	98
7	4,9	6,0	72	10	4,5	692	132

(2ème Partie)

TENEUR EN MANGANESE DE QUELQUES PLANTES EN RAPPORT AVEC LA TOXICITE DE L' ELEMENT

N° des cas	Plante cultivée	Mn en p.p.m. de matière sèche		Observations	Mode de culture
		Grains	Paille à la récolte		
1	Avoine V. Multigrap	121 p.p.m.	218 p.p.m.	Végétation normale	Pots
	Avoine V. Meadag	167	408		
2	Avoine V. Multigrap	244	590	Végétation normale	Pots
	Avoine V. Meadag	292	975		
3	Avoine d'hiver V. Prieuré		154	Effet dépressif en	Parcelles
	Avoine de printemps Multigrap	123	244	début de végétation	
	Pomme de terre V. Bintje	feuilles le 6 Juin	850 p.p.m.	Croissance normale	Parcelles
4	Avoine V. Multigrap	445		Léger effet dépressif	Pots
	Haricot à grains (Phaseolus vulgaris)	Plante entière à la récolte	13.190 p.p.m.	Toxicité sérieuse	Pots
	Pomme de terre V. Ackersegen	feuilles le 14 Juin	490 p.p.m.	Légère chlorose	Pots
5	Pomme de terre V. Ackersegen	feuilles le 24 Mai	5.740 p.p.m.	Toxicité sérieuse	Pots
		tiges le 25 Juillet	4.233 p.p.m.	Voir photo n° 13	
6	Avoine V. Multigrap		3.600 p.p.m.	Récolte insignifiante	Pots
	Haricots			Ne lèvent pas	Pots
	Pomme de terre			Ne lèvent pas	Pots
7	Avoine			Stérilité complète	Pots
	Haricots			Stérilité complète	Pots
	Pomme de terre			Stérilité complète	Pots

Observations.

(Les terres sont classées par ordre de toxicité croissante dans le tableau IX.)

*N*o 1 *et* 2. — Terres carencées à l'origine et fournissant des récoltes normales par la suite ; 1952 et 1953 : avoines saines ; 1954 : pommes de terre saines.

*N*o 3. — Symptômes de toxicité sur avoines. Effet dépressif très net au début de la végétation.

N° 4. — Effet dépressif sur avoine ; 1953 : symptômes de toxicité, graves sur haricot ; 1954 : légère chlorose sur pomme de terre.

N° 5. — Effet dépressif net et symptômes caractéristiques de la toxicité en Mn sur pomme de terre en 1954 (année de l'apport du sulfate de manganèse).

N° 6. — 1952 : avoine, récolte insignifiante ; 1953 : les haricots ne lèvent pas ; 1954 : les pommes de terre ne lèvent pas.

N° 8. — Stérilité complète.

Descriptions des symptômes de toxicité.

Avoine d'hiver. — Extrémités des feuilles nécrosées en février mais, par la suite, végétation presque normale.

Avoine de printemps. — Dès le stade 2 feuilles, on voit l'extrémité de la première feuille rougie sur une longueur de 2 à 3 centimètres, avec

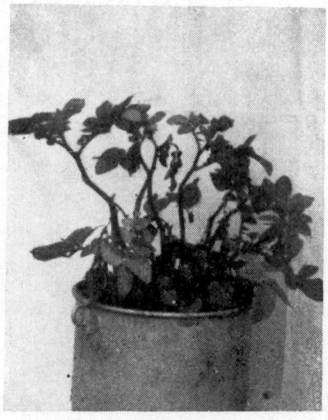


Photo N° 13. — Manifestations de la toxicité en manganèse sur la pomme de terre.

Photo N° 14. — Toxicité en manganèse sur pomme de terre, pot du milieu. A gauche pot témoin, à droite, pot avec sulfate d'alumine.

une chlorose générale de la plante. Ces extrémités deviennent nécrotiques, puis, ce sont les 2e et 3e feuilles qui sont atteintes à leur tour. Dans les cas extrêmes (n° 7), la plantule développe sa première feuille, puis, se dessèche complètement au moment de l'apparition de la deuxième.

Haricot. — La croissance est considérablement réduite, les nervures sont brunes, surtout à la base des folioles, et les jeunes feuilles sont chlorotiques. Dans les cas extrêmes, les graines ne lèvent pas.

Pomme de terre (variété Ackersegen). — Un mois après plantation, une forte chlorose est visible à la base des folioles et le long de la nervure principale. Par la suite, de très petits points bruns, visibles sur la face supérieure comme sur la face inférieure, apparaissent sur toutes les surfaces

foliaires. En juin, des taches brunes (1 à 2 mm de largeur sur 6 à 7 mm de longueur) se développent sur les tiges, puis des pétioles se dessèchent, se cassent à l'aisselle en provoquant ainsi la mort de la feuille correspondante. La récolte en tubercules est diminuée de 30 p. 100 environ pour le cas n° 5, où ces symptômes ont été observés. Pour les terres n° 6 et 7, les germes arrivent jusqu'au niveau du sol mais leur évolution en reste là.

La photo n° 13 illustre ces symptômes et montre, en particulier, des pétioles et feuilles desséchés ; la tige de gauche a perdu ainsi une grande partie de ses feuilles. La photo n° 14 reproduit à nouveau le même pot entouré, à gauche d'un pot témoin, à droite d'un pot ayant reçu, au lieu de l'équivalent de 2,5 tonnes de SO_4Mn, H_2O/ha (soit 7 g de SO_4Mn sec pour 10 kg de terre), l'équivalent de 1,25 tonne de Sulfate d'alumine (soit 4 g $(SO_4)_3Al_2$, 9 H_2O pour 10 kg de terre). Il apparaît donc ainsi que pour des pH très voisins, la toxicité du manganèse est sérieuse alors que celle de l'aluminium n'apparaît pas pour cette dose (Pot Témoin pH = 5, pot Mn 4,85, pot Al 4,85).

Les expériences de BERGER et GERLOFF, que nous venons de citer, démontrent, de plus, que les symptômes de toxicité observés sur pomme de terre sont reproductibles en cultures sur solutions et ne sont occasionnés, ni par la concentration en ions hydrogène, ni par l'aluminium soluble, ni par une déficience en calcium ou en magnésium. Les symptômes décrits semblent assez analogues à ceux que nous avons observés nous-mêmes et sont désignés par ces auteurs sous le vocable « Stem streak necrosis ».

Discussion.

La première partie du tableau IX précise, dans ses 3 colonnes de droite, le pH, le Mn échangeable et le Mn facilement réductible enregistrés pour les sols expérimentés après incorporation de sulfate de manganèse à forte dose. Dans ce tableau, les sols sont rangés par ordre de pH décroissant et ils se trouvent rangés également par ordre de toxicité croissante. L'abaissement du pH des sols est, nous l'avons déjà signalé, toujours lié à un accroissement de Mn échangeable d'où à une alimentation manganique plus abondante et, éventuellement, à une toxicité plus marquée.

Si nous comparons les terres n° 4 et n° 5, nous voyons que le pH du n° 5 est légèrement plus faible (0,2 unité) mais que Mn échangeable est 3 fois plus élevé, ce qui explique la toxicité très grave de la pomme de terre dans ce dernier cas, alors que sur la terre n° 4, le phénomène de toxicité est très atténué. La teneur des feuilles de pomme de terre en manganèse est plus de 10 fois plus forte pour le n° 5. Les sols 6 et 7 n'accusent qu'une faible diminution de pH par rapport au sol n° 5, mais leur

Mn échangeable multiplié par 10, puis par plus de 20, explique la stérilité observée.

Entre les cas 2 et 3, la diminution de pH est faible et le Mn échangeable est 10 fois plus faible pour le n° 3 alors que les Mn réductibles sont voisins. Les symptômes légers de toxicité observés en 3 sont probablement dus au fait que les cultures ont suivi, de quelques jours seulement pour l'avoine d'hiver, de 3 mois pour l'avoine de printemps, les enfouissements de SO_4Mn. Ce dernier sel, mal mélangé au sol, ne devait pas être complètement oxydé et provoquait la formation de poches très riches en manganèse manganeux très soluble. L'année suivante on n'a, en effet, observé aucun symptôme dépressif sur céréale.

Le cas n° 4 semble, toutefois, nous préciser les limites de toxicité pour un sol de *pH voisin de* 5. La valeur 10 *p. p. m. de Mn échangeable* représente, certainement, le seuil à ne pas dépasser puisqu'avec 11 p. p. m. nous observons une toxicité sérieuse sur haricot (plante sensible) et une très légère action dépressive sur avoine (plante peu sensible). Pour les sols de pH supérieur à 5, la limite de toxicité se situera, bien entendu, à des valeurs de Mn échangeable supérieures, mais nos expériences ne nous apportent pas de précisions sur ce point : elle serait, cependant, supérieure à 30 p. p. m. de Mn échangeable et à 500 p. p. m. de Mn réductible (cas n° 2).

La seconde partie du tableau IX nous donne, pour les cas 1 et 2, la teneur en Mn de la matière sèche des pailles et grains d'avoine à la récolte pour des végétaux n'ayant pas souffert de toxicité. Nous remarquons, d'abord, des différences importantes de teneur entre deux variétés d'avoine de printemps : Multigrap, très sensible à la carence, est moins riche en manganèse que Mesdag assez résistante. La différence de ces teneurs est, pour les pailles, voisine du simple au double. Autre remarque, ces teneurs en manganèse sont nettement plus élevées que celles susceptibles d'être rencontrées chez des avoines ayant poussé sur des sols normaux. Nous pouvons nous représenter un sol » normal « par les ordres de grandeur suivants : pH 6,5 à 7, Mn échangeable $>$ 1 p. p. m., Mn réductible 100 p. p. m. Les teneurs en Mn des grains et pailles de céréales portées sur les graphiques III et IV, jusqu'à la parcelle 5 seulement (chapitre A, seconde partie du mémoire), peuvent être prises comme base. Elles sont comprises entre 30 et 50 p. p. m. pour les grains, 15 et 60 p. p. m. pour les pailles. Si nous comparons, à présent, les cas 2 et 3, nous pouvons remarquer que la paille d'avoine Multigrap de 3 est moins riche que celle de 2 : 244 p. p. m. contre 590 p. p. m.

Ce fait peut paraître anormal puisque le sol n° 3 est plus acide (0,3 unité seulement) et que des symptômes légers de toxicité se sont manifestés. Nous avons déjà dit ce qu'il fallait penser de cet essai effectué peu de temps après l'enfouissement du sulfate de manganèse, d'autre part,

il y a lieu de remarquer qu'il s'agit d'une expérience réalisée en parcelles alors que l'expérience n° 2 a été réalisée en pots. Cependant, Mn échangeable est beaucoup plus faible pour le n° 3 (10 fois). Mn réductible est un peu plus faible également dans le cas n° 3. Nous pensons que la caractérisation des sols, non enrichis en sels de manganèse, est, en général, meilleure avec Mn réductible pour les pH supérieurs à 6 et meilleure avec Mn échangeable, pour les sols de pH inférieur à 6 (cas des sols les mieux pourvus en Mn échangeable).

Revenons au tableau IX pour noter la teneur en Mn de plantes manifestant des symptômes nets de toxicité. Dans le cas de la pomme de terre, nous avons des chiffres de l'ordre de 5 000 p. p. m. par rapport à la matière sèche des tiges ou des feuilles, soit 0,5 p. 100. Dans le cas de la plante entière du haricot, nous arrivons à 13 000 p. p. m., soit 1,3 p. 100 ; il s'agit là, bien entendu, de teneurs telles que le manganèse ne peut plus être considéré comme un oligo-élément.

F. — ACTIVITÉ DU MANGANÈSE DES SCORIES DE DÉPHOSPHORATION

Les scories Thomas ont une teneur en manganèse très supérieure à celle des autres engrais, aussi, étant donné les doses utilisées dans les régions à sols pauvres en acide phosphorique, la quantité de manganèse apportée au sol est loin d'être négligeable. Gericke S. (44) donne, comme teneur en MnO des scories, des chiffres variant de 2 à plus de 8 p. 100 avec une moyenne de 5,2 soit 4 p. 100 exprimé en Mn. Nous avons trouvé, pour deux échantillons de scories Thomas livrées à l'agriculture française, respectivement 2,73 et 3,35 de MnO p. 100, soit 2,12 et 2,60 exprimé en Mn. Si nous employons des scories à 3 p. 100 de Mn, nous constatons que 10 tonnes/hectare d'engrais (dose susceptible d'être atteinte au bout d'une dizaine d'années par exemple) fournissent 300 kg de Mn, soit une quantité capable d'enrichir la couche arable de 100 p.p.m. environ. Un enrichissement de cet ordre n'est pas négligeable puisque, nous l'avons vu au début du mémoire, les sols granitiques finistériens contiennent souvent moins de 200 p. p. m. de Mn total. D'autre part, les exportations provoquées par les récoltes sont insignifiantes par rapport au stock de manganèse total, il en est de même des pertes occasionnées par les eaux de drainage. Dans les eaux de drainage des cases lysimétriques de la Station d'Agronomie de Quimper, les quantités de manganèse sont de l'ordre de 2 à 4 mg par mètre cube, soit des valeurs négligeables même pour un drainage de 300 mm par an (6 à 12 g par hectare).

Quantités de manganèse exportées par les récoltes. — Voici l'ordre de grandeur des exportations effectuées par les récoltes d'après des esti-

mations moyennes de rendement et de teneur en Mn observés en Bretagne :

Céréales carencées :

Paille 30 q de M. S. à 10 p. p. m. Mn soit 30 g Mn/ha.

Grain 15 q de M. S. à 20 p. p. m. Mn soit 30 g Mn ha.

Total 60 g Mn/ha.

Céréales non carencées :

Paille 70 q de M. S. à 25 p. p. m. Mn soit 175 g Mn/ha.

Grain 40 q de M. S. à 40 p. p. m. Mn soit 160 g Mn/ha.

Total 335 g Mn/ha.

Pomme de terre (en terre non carencée) :

Tubercules 7 tonnes de M. S. à 7 p. p. m. Mn soit 50 g Mn/ha.

Fanes 2 tonnes de M. S. à 80 p. p. m. Mn soit 160 g Mn/ha.

Total 210 g Mn/ha.

Ray-grass italien :

Sol carencé — 6 tonnes de M. S. en une année à 20 p. p. m. Mn soit 120 g Mn/ha.

Sol non carencé — 10 tonnes de M. S. en une année à 80 p. p. m. Mn soit 640 g Mn/ha.

On voit, par ces quelques exemples, les écarts importants qui existent entre les exportations de récoltes normales et les exportations de récoltes provenant de sols déficients en manganèse. Dans le cas de prairies temporaires ou de fourrages annuels à forte production, les besoins en manganèse sont nettement plus élevés mais au cours d'un assolement normal comportant céréales, plantes sarclées, fourrage annuel, nous ne pensons pas que la moyenne des exportations dépasse 300 g Mn/ha par récolte. Le stock de manganèse total contenu dans les sols les moins bien pourvus atteint environ 600 kg/ha (1 500 kg dans les sols normaux).

Effet des apports de scories Thomas à forte dose. — S'il est incontestable que les scories, même utilisées à doses normales, auront une influence fortement positive sur le bilan du manganèse, il serait intéressant de savoir si les mêmes doses peuvent réduire ou supprimer les carences graves, malgré la chaux qu'elles apportent et qui agit en sens inverse. Dans les régions que nous connaissons bien, les cultivateurs emploient des scories depuis plusieurs années déjà et, malgré cela, il est souvent nécessaire de pulvériser les céréales avec une solution de sulfate manganeux. On peut, toutefois, se demander si l'effet cumulé de doses normales de scories Thomas ne pourra pas, au bout d'un certain nombre d'années, enrichir suffisamment les sols en Mn total, de manière à ce que l'élévation de la teneur en Mn actif, qui s'en suit, soit capable d'atténuer la déficience. Ceci semble tout à fait possible mais, pour le démontrer. il est nécessaire d'organiser un essai de très longue durée. Nous avons

essayé de le démontrer en incorporant au sol, en une seule fois, la dose de scories qui serait, dans la pratique agricole, incorporée en plusieurs années.

1er *essai.* — Incorporation de 1 tonne, 2 tonnes, et 3 tonnes de scories, avant un semis d'avoine, dans une parcelle donnant habituellement des céréales avec symptômes de carence. En cours de végétation, la parcelle Témoin a toujours été plus jaune que les parcelles à scories avec symptômes pathologiques un peu plus graves. En mai, l'avoine des différentes parcelles est bien repartie et a donné une récolte acceptable. Cette terre était déjà assez bien pourvue en acide phosphorique aussi, nous ne pensons pas, que l'effet P_2O^5 ait été très important. Le dispositif expérimental comprenait 4 parcelles d'un are, sans répétition des traitements. Voici les résultats de la pesée du grain :

Témoin	15,4 qx/ha
Scories 1 tonne/ha	22,5 —
Scories 2 tonnes /ha	17,4 —
Scories 3 tonnes/ha	21,0 —

Devant la difficulté d'expérimenter en plein champ, nous avons réalisé des essais en pots.

2e *essai.* — Mélange intime des scories à toute la masse de terre des pots immédiatement avant un semis d'avoine de printemps. Une fumure phosphatée à base de phosphate monopotassique est, en outre, appliquée à tous les pots :

	Récolte de M. S. par pot	
Pot Témoin	6 g	pas d'épis
Pot 1 T : (3,34 g de scories pour 10 kg de terre, soit environ l'équivalent de 1 tonne/Ha	13 g	
Pot 2 T (6,68 g de scories	20,4 g	(4 petits épis et 3 tardillons.

Il y a eu des symptômes de carence grave dans tous les pots mais la carence était moins sérieuse dans le pot 2 T.

3e ess*ai.* — Réalisé sur un sol différent de celui que nous venons de citer mais dans des conditions identiques.

	Récolte de M. S. par pot	
1ers symptômes de carence visibles le 29 Avril.		
Pot Témoin 1	3 g	
Pot Témoin 2	3,1 g	
1ers symptômes de carence visibles le 9 Mai.		
Pot 3 T (10 g de scories)	7 g	(pas d'épis)
Pot 4 T (13,4 g de scories)	19 g	(4 petits épis)

La photo nº 15, prise le 4 juillet 1955 un peu avant la récolte, illustre les résultats obtenus, soit une carence extrêmement grave dans les pots témoins et une production de paille un peu meilleure dans le

pot 4 T. En 1956, une nouvelle avoine a été semée dans ces 4 pots ; les résultats furent identiques, le pot 4 T ne donnant pas des résultats très supérieurs aux autres.

4e *essai.* — Nouvelle série de 4 pots avec les traitements suivants : Témoin, 30 g scories pour 10 kg de terre, soit environ 10 tonnes /ha, 60 g scories (20 t/ha), 90 g scories (30 t/ha). Il s'agit toujours d'un sol

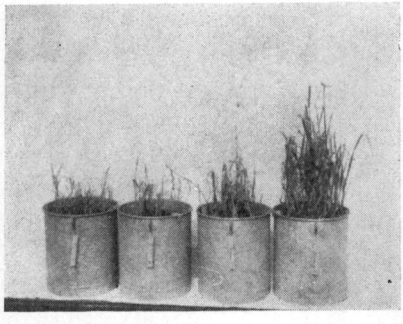


Photo N° 15. — 4 Juillet 1955 — De gauche à droite : 2 pots témoins, 1 pot avec 10 g de scories, 1 pot avec 13,4 g de scories.

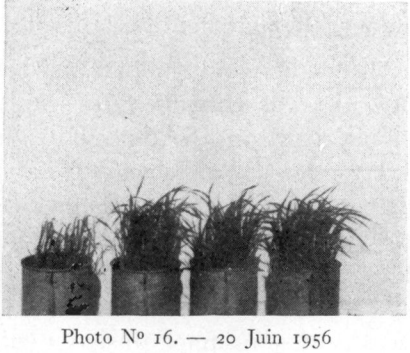


Photo N° 16. — 20 Juin 1956

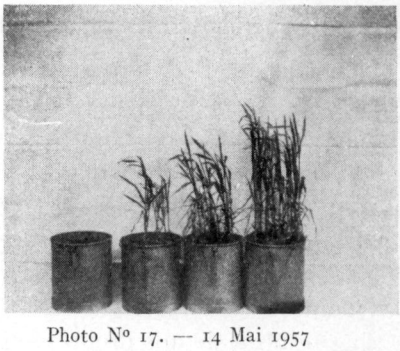


Photo N° 17. — 14 Mai 1957

3e essai — De gauche à droite : pot témoin, pot avec 30 g de scories, pot avec 60 g de scories, pot avec 90 g de scories.

provenant d'une parcelle nettement déficiente. Les cultures successives ci-dessous ont été expérimentées :

1er culture : avoine, carence très grave dans le pot pas de Témoin, carence dans les 3 pots avec scories. La photo n° 16 nous montre l'état de la végétation le 20-6-56.

2e culture : blé d'hiver, carence très grave pour le Témoin, un peu moins grave pour 10 T et 20 T, encore sensible pour le pot 30 T. La photo n° 17 illustre parfaitement les différences de végétation existant le 14-5-57.

Ces doses élevées de scories se sont donc révélées capables d'annihiler la carence au cours des premiers mois qui ont suivi leur incorporation au sol. Mais, dès la seconde année, la carence réapparaît avec une

gravité atténuée. Il s'agit, ici, d'essais réalisés en vases de végétation et nous savons que, dans la pratique, les racines de céréales qui rencontrent un sous-sol acide permettent, à partir d'une certaine époque, l'alimentation normale en manganèse de la plante. Il était intéressant de placer le contenu de ces pots au-dessus d'un sous-sol acide pour y cultiver à nouveau une plante sensible. Cet essai, réalisé en 1958 sur avoine, a permis d'observer des symptômes de carence, légers pour le pot Témoin et très légers pour les 3 pots à scories mais une chlorose, d'un autre ordre, affectait ces derniers pots. Les oxydes de manganèse des scories Thomas présentent incontestablement une certaine assimilabilité mais, avec le temps, cette activité diminue, phénomène observé également dans le cas d'enfouissements de sulfate manganeux. L'analyse des terres, effectuée 8 mois après la préparation des pots, indique bien un net accroissement de Mn échangeable et de Mn réductible malgré l'élévation du pH :

Pot témoin : pH 6,9 ; Mn échangeable 0,9 p. p. m. ; Mn réductible 15,5 p. p. m.
Pot 10 T : pH 7,35 ; Mn échangeable 1,2 p. p. m. ; Mn réductible 18,0 p. p. m.
Pot 20 T : pH 7,55 ; Mn échangeable 1,8 p. p. m. ; Mn réductible 27,5 p. p. m.
Pot 30 T : pH 7,7 ; Mn échangeable 2,3 p. p. m. ; Mn réductible 41,5 p. p. m.

En se basant sur les normes établies précédemment, ce serait seulement à partir de la dose 20 tonnes/ha au minimum et dans le cas précis de ce sol, que les scories pourraient éliminer complètement la déficience.

Conclusion. — S. GERICKE (45), en Allemagne, avait montré, pard es essais en pots sur cinq types de sols, que les oxydes de manganèse des scories Thomas avaient une action légèrement inférieure à celle du sulfate de manganèse mais qu'ils étaient capables d'exercer une influence sur l'état sanitaire de l'avoine. Il est à remarquer que ces essais furent conduits sur des sols présentant une carence très légère contrairement à ce que nous avons observé en Bretagne où la récolte était souvent nulle dans les pots « témoin ».

Le résultat de nos propres expériences peut se résumer ainsi : en culture en pots, des doses de scories de l'ordre de 1 à 4 tonnes ha diminuent l'intensité de la carence en manganèse des céréales, alors que des doses au moins égales à 10 tonnes/ha annihilent la carence, pour une première culture de céréales seulement. On peut en déduire que l'utilisation de fortes doses de scories, répétées pendant plusieurs années, va provoquer une diminution sensible des pertes de rendement occasionnées aux céréales par la carence en manganèse.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Le chaulage des terres acides et humifères de l'Ouest de la Bretagne provoque, fréquemment, l'apparition de carences en manganèse, avec diminution importante du rendement en paille et en grain des céréales. Y. COIC a étudié, en détail, les manifestations de ces carences sur les

céréales et les moyens de lutte propres à les contrecarrer. La carence en manganèse, qui se produit quelques années après l'enfouissement au sol des calcaires marins, est parfois visible sur pomme de terre, épinard, trèfle incarnat et petits pois mais se limite pour ces cultures à des chloroses suivies de faibles chutes de rendement. Le résultat serait le même par chaulage à la chaux, au calcaire broyé ou à la chaux magnésienne. Une expérience a même montré que le carbonate de magnésie pur provoquait, également, une chute de l'assimilabilité des oxydes manganiques des sols.

Dans le présent mémoire, nous nous sommes, tout d'abord, préoccupés des différentes formes du manganèse dans le sol puis, nous nous sommes efforcés d'établir des relations entre ces différentes formes et le développement puis la teneur en Mn des végétaux cultivés.

Le dosage du manganèse total, par attaque fluorhydrique dans plus de cent échantillons de roches en provenance de diverses localités bretonnes, donne comme moyennes : 115 p. p. m. de Mn pour les granulites, 231 p. p. m. pour les granites, 561 p. p. m. pour les schistes primaires. La teneur en manganèse total de la couche arable des sols est sous la dépendance de la roche-mère. Une comparaison est faite avec les chiffres relevés dans la littérature étrangère. Les cas de carence sont, justement, plus fréquents en régions granitiques qu'en régions schisteuses, ce qui confirme le résultat des dosages de Mn total.

Pour définir la fraction du manganèse total des sols susceptible d'être qualifiée d' « assimilable », nous avons étudié, essentiellement, le manganèse dit « échangeable » et le manganèse « facilement réductible » (par l'hydroquinone), puis nous nous sommes attachés à caractériser l'alimentation manganèsifère par les trois facteurs : pH du sol, Mn échangeable, Mn réductible. On peut admettre les valeurs suivantes pour les sols carencés : pH > 6, Mn échangeable $\leqslant 1$ p. p. m., Mn facilement réductible < 20 p. p. m. ; l'influence de la profondeur de la couche arable chaulée sur la gravité de la déficience a été étudiée en vases de végétation. Dans la zone de pH 5-6, c'est le manganèse échangeable et le pH qui sont importants, tandis que dans la zone de pH 6-7, c'est le manganèse réductible qui est important. Les dosages de Mn échangeable sont difficilement reproductibles, aussi, sa détermination permet de déceler les carences si le chiffre est nettement inférieur à 1 p. p. m. avec un pH nettement supérieur à 6, mais, aux environs de 1 p. p. m., il y a incertitude et il est nécessaire de doser Mn réductible.

La transformation du sulfate manganeux enfoui dans les sols a été suivie ainsi que les rapports existant entre le manganèse total, le manganèse facilement réductible et le manganèse échangeable pour un pH constant.

L'examen des divers horizons de profils de sols acides nous a permis d'établir une corrélation positive entre la teneur en matières organiques et le rapport Mn réductible sur Mn total, qui expliquerait la plus grande

mobilité des oxydes manganiques, en présence de matière organique acide, alors qu'en présence de matière organique alcaline l'inverse se produit.

Du point de vue pédologique, le manganèse facilement réductible ne donne pas d'indications utiles, alors que le manganèse total varie dans le même sens que le fer libre mais semble, toutefois, migrer à une profondeur supérieure.

Au premier chapitre de la seconde partie du mémoire, nous donnons la teneur en manganèse de récoltes de céréales cultivées, pendant 7 années consécutives, sur les mêmes parcelles plus ou moins enrichies par le sulfate de manganèse.

Une expérience, effectuée en pots, précise que le chaulage, faisant passer le pH d'un sol de 5 à 7, amène l'apparition des premiers symptômes de carence en manganèse sur avoine au bout d'un an, alors que la carence devient très grave au bout de deux ans.

Un chapitre est ensuite consacré à la discussion des seuils de carence, pour le sol puis pour les végétaux. Nous admettons que lorsque les feuilles d'une plante quelconque contiennent moins de 20 ou 25 p. p. m. de Mn dans leur matière sèche, il y a lieu de présumer une mauvaise nutrition en cet élément. Si, du point de vue richesse en Mn de la ration des bovins, on retient le chiffre minimum de 20 p. p. m., nous faisons remarquer que les grains, les pailles et certaines plantes fourragères sont souvent moins riches sur les sols carencés.

En pots de végétation et en petites parcelles, nous avons ajouté du sulfate de manganèse à des sols acides pour étudier les manifestations de la toxicité manganique sur différentes plantes cultivées. La pomme de terre et le haricot extériorisent de graves symptômes de toxicité, pour des sols de pH 4,8-5, avec un Mn échangeable d'au moins 10 p. p. m. et un Mn réductible supérieur à 100 p. p. m. Aux États-Unis, il a été signalé, sur pomme de terre, des cas de toxicité en manganèse, naturels, en sols très acides et riches en oxydes manganiques. En Bretagne, où l'on cultive assez fréquemment la pomme de terre dans des champs très acides, il importait de connaître les signes de cette toxicité pour déceler des cas éventuels.

Le dernier chapitre donne les résultats des essais réalisés en vue de connaître l'efficacité des oxydes de manganèse contenus dans les scories de déphosphoration. Des doses de 1 à 4 tonnes de scories par hectare, apportées en une seule fois, diminuent l'intensité de la carence en manganèse des céréales, aussi, on peut en déduire que l'utilisation de fortes doses de scories, comme engrais phosphatés, répétées pendant plusieurs années, atténuera, d'une manière sensible, les baisses de rendement occasionnées par cette carence.

Reçu pour publication le 6 *avril* 1959.

RÉSUMÉ

A la suite de la recherche de moyens pratiques de lutte contre la carence en manganèse des céréales en Bretagne, nous avons effectué, d'un point de vue plus général, un ensemble de travaux sur le manganèse des sols et son incidence sur le développement des végétaux.

Après avoir apporté quelques précisions sur la teneur en manganèse total des roches et des sols, nous avons spécialement étudié la fraction des oxydes manganiques facilement réduite à froid par l'hydroquinone, l'influence du pH du sol et de sa matière organique, l'intérêt agronomique de cette fraction. Une étude pédologique du manganèse dans quelques profils de sols bretons y fait suite.

Dans la seconde partie du mémoire, nous donnons, en particulier, les rapports entre la teneur en manganèse des végétaux et la présence ou l'absence de symptômes de carence d'une part, le pH des sols et leur richesse en «manganèse échangeable », « manganèse réductible », « manganèse total » d'autre part.

Les derniers paragraphes sont consacrés à la détermination des seuils de carence, à la toxicité des sels manganeux enfouis dans les sols acides, à l'efficacité des oxydes de manganèse des scories Thomas.

A l'occasion de chaque chapitre, les données bibliographiques les plus importantes s'y rapportant sont citées.

SUMMARY

During investigations on the practical control of manganese deficiency of cereals in Brittany, a general study of soil manganese and of its effect on plant development was made.

Following some data on the total manganese content in parent rocks and soils, a special study was made of the manganese oxide fraction easily reduced by cold hydroquinone, of the effects of pH and soil organic matter, and of the agricultural importance of this fraction. A pedological study of manganese in some soil profiles in Brittany was also made.

The second part of the study contains data on the relationship between the manganese concentrations in plants and the presence or absence of deficiency symptoms, and between the pH and the levels of exchangeable manganese, reducible manganese and total manganese in the soil.

The study ends with the determination of limit values for manganese deficiency, and with the toxicity of manganous salts applied to acid soils and efficiency of manganese oxides in basic slags.

Each chapter is followed by a list of the most important references.

ZUSAMMENFASSUNG

Nachdem praktische Bekämpfungsmittel bei der Manganmangelkrankheit des Getreides in der Bretagne gesucht wurden, haben wir, allgemein gesehen, eine Anzahl von Arbeiten über das Bodenmangan und sein Einfluss auf die Entwicklung der Pflanzen unternommen. Nach einigen genaueren Angaben über den Gesamtmangangehalt der Gesteine und der Böden, haben wir

speziell die Fraktion der bei gewöhnlicher Temperatur durch Hydrochinon leicht reduzierbaren Manganoxyde untersucht, sowie den Einfluss der Bodenreaktion und der organischen Substanz und die landwirtschaftliche Wichtigkeit dieser Fraktion. Eine bodenkundliche Untersuchung des Mangans in einigen Profilen bretonischer Böden folgt.

In dem 2.Teil dieser Denkschrift, geben wir, im besondern, die Beziehungen zwischen Mangangehalt der Pflanzen und die Anwesenheit oder Abwesenheit von Mangelerscheinungen einerseits, zwischen Bodenreaktion und « austausbares Mangan », « reduzierbares Mangan », « Gesamtmangan » andererseits.

Die letzten Kapitel befassen sich mit der Bestimmung der Grenzwerte für Mangelerscheinungen, mit der toxischen Wirkung der Mn II Salze die in saure Böden gebracht werden, mit der Wirksamkeit der Mangan-Oxyde des Thomasmehls.

Für jedes Kapitel werden stets die wichstigsten Referate wiedergegeben.

Марганец в почвах Бретани и его отношение к питанию растений.

М. КОППЕНЭ.
Кимперская Агрономическая Станция.

РЕЗЮМЭ

Продолжая розыски практических средств борьбы с недостатком марганца для злаков в Бретани, мы произвели, с более общей точки зрения, совокупность работ, касающихся почвенного марганца и его влияния на развитие растений.

Представив некоторые точные данные относительно содержания горных пород и почв в марганце, мы специально изучили ту часть марганцевых окислов, которая легко восстанавливается (редуцируется) при обычной температуре (т.-е. без подогревания) гидрохиноном, влияние почвенной реакции (pH) и реакции почвенного органического вещества, равно как и агрономический интерес этой части (марганцевых окислов). Следует педологическое изучение марганца в нескольких профилях бретонских почв.

Во второй части работы, мы даем, в частности, отношения между содержанием марганца в растениях и, с одной стороны, присутствием или отсутствием признаков недостатка (голода), с другой стороны, между почвенным pH и содержанием в почвах «обменного марганца», «восстанавливаемого марганца» и «общего марганца».

Последние параграфы посвящены определению порогов недостатка (голода), вредности солей двухвалентного марганца внесенного в кислые почвы и эффективности окислов марганца томасовых шлаков.

В каждой главе приводятся главнейшие библиографические данные к ней относящиеся.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) Coïc (Y.) et Coppenet (M.). — *C. R. Ac. Agr.*, **35**, 8, 323-328, 1949. — *C. R. Ac. Sc.*, **228**, 17, 1379, 1949.
(2) Coïc (Y.) et Coppenet (M.). — Sur la carence en manganèse des céréales dans les sols humifères de Bretagne. Ann. de l'I. N. R. A., Série A, *Physiologie végétale*, supp. II, 111, 138, 1958.
(3) Coleou (J.). — Minéraux, Vitamines, Antibiotiques. *La revue de l'Elevage*. N° spécial, p. 80, 1957.
(4) Moissan (H.). — *Traité de chimie minérale*, **4**, p. 487. Masson édit. Paris 1905.
(5) Cité par Demolon (A.). — Dynamique du sol, p. 1. Dunod éditeur, Paris 1952.
(6) Cité par Rinne (F.). — La science des roches (3e éd. trad. par L. Bertrand), p. 99. Lamarre éditeur. Paris 1928.
(7) Coppenet (M.). — Dosage du manganèse dans les végétaux. *Ann. Agron.*, **5**, p. 798-900, 1949.
(8) Ducet (G.) et coll. — Méthodes de dosage colorimétrique rapide. *Ann. Agron.*, p. 378, 1951.
(9) Coppenet (M.) et Calvez (J.). — Sur l'origine des carences en cuivre. 6e Congrès International de la Science du Sol, V. 2, p. 493, Paris 1956.
(10) Fairbairn (H. W.). — U. S. Geol. Survey Bull., 980. Washington 1951.
(11) Wager (L. R.) et Mitchell (R. L.). — *Mineralogical magazine*, **26**, p. 283-296, 1943.
(12) Blair (A. W.) et Prince (A. L.). — *Soil Science*, **42**, p. 327-333, 1936.
(13) Toth (S. J.). — *Soil Science*, **71**, p. 467-472, 1951 et **78**, p. 295-303, 1954.
(14) Vickar (Mc) et Malcolm (H.). — *J. Am. Soc. Agron.*, **34**, p. 123-128, 1942.
(15) Price (N. O.) et coll. — Agricultural and Food Chemistry, p. 226-229, 1955.
(16) Sullivan (M. X.) et Robinson (W. O.). — *U. S. Dept. Agr. Bur. Soils Circ.*, **75**, p. 3.
(17) Robinson (W. O.). — *Soil Science*, **27**, p. 335-360, 1929.
(18) Contino (A.). — *Staz. Sper. Agr. Ital.*, **33**, 1, p. 51-55, 1911.
(19) Della Gatta (L.). — *Ann. Sper. Agrar. Roma*, **7**, p. 439-460, 1953.
(20) Teakle (L.). et coll. — *J. Dept. Agr. Western Australia*, **10**, p. 340-354, 1933.
(21) Chiu (T. F.). — *Agric. Res.*, **1**, 2, p. 31-47, 1950.
(22) Leeper (G. W.). — *Soil Science*, **63**, 2, p. 79-94, 1947.
(23) Trocme (S.) et coll. — *Ann. Agron.*, **5**, p. 663-685, 1950.
(24) Fujimoto et Sherman (G. D.). — *Soil Science*, **66**, p. 131-145, 1948.
(25) Dion et Mann. — *J. Agric. Sc.*, **36**, p. 239, 1946.
(26) Boken (E.). — *Plant and Soil*, **9**, 3, p. 269-285, 1958.
(27) Sherman (G. D.) et Harmer (P. M.). — Soil Science Society of America, *Proceedings*, **7**, p. 398-405, 1942.
(28) Schachtschabel (P.). — 6e Congrès Int. Science du sol, **4**, 18, p. 113-118, Paris 1956.
(29) Coppenet (M.) et Calvez (J.). — *Ann. Agron.*, **3**, p. 351-358, 1952.
(30) Bittel (R.). — *Ann. Agron.*, **1**, p. 91-109, 1957.
(31) Guennelon (R.). — *Ann. Agron.*, **5**, p. 580-582, 1951.
(32) Heintze (S. G.) et Mann (P. J. G.). — *Journal of Soil Science*, **2**, 2, p. 234-242, 1951.
(33) Heintze (S. G.). — *Journal of Soil Science*, **8**, 2, p. 287-300, 1957.
(34) Betremieux (R.). — Thèse. *Ann. Agron.*, **3**, p. 193-295, 1951.

(35) SHERMANN (G. D.) et coll. — *J. Am. Soc. Agron.*, **34**, p. 1076-1083, 1942.
(36) AUBERT (G.). — Excursion Ouest du 6e Congrès International de la Science du sol. Paris 1956.
(37) MITCHELL et MACKENZIE. — *Soil Science*, **77**, 3, p. 173, 1954.
(38) BROMFIELD et SKERMAN. — *Soil Science*, **69**, p. 337-349, 1950.
(39) COPPENET (M.). — *C. R. Ac. Agr.*, **38**, p. 193-195, 1952.
(40) SHERMAN (G. D.) et coll. — *Soil Science*, **54**, 4, p. 253-257, 1942.
(41) SAMUEL (G.) et PIPER (C. S.). — *Ann. Appl. Biol.*, **16**, p. 493, 1929.
(42) FINCK (A. von). — *Die Phosphorsäure*, **14**, 2, 1954.
(43) BERGER (K. C.) et GERLOFF (G. C.). — *American potato Journal*, **24**, 5, p. 156-162, 1947.
(44) GERICKE (S.). — *Die Phosphorsäure*, **12**, 4, 1952.
(45) GERICKE (S.). — Bodenkunde und Planzenernährung, **19**, 64, p. 187-201, 1940.

UN MILIEU DE CULTURE SYNTHÉTIQUE POUR RHIZOBIUM MELILOTI

PAR

P. FERRY, H. BLACHERE et M. OBATON (1)

Station centrale d'Agronomie, Versailles.

PLAN DU MÉMOIRE

I. — Introduction.
Historique et bibliographie.

II. — Méthodes expérimentales.
1° Milieux de culture : préparation et stérilisation.
2° Souches utilisées.
3° Ensemencement.
4° Incubation.
5° Mesure de la croissance. Expression des résultats.
6° Contrôle de pureté.

III. — Facteurs de croissance.
A) Détermination des facteurs de croissance essentiels.
1° Milieu de base.
2° Facteurs de croissance.
3° Résultats.
4° Discussion — Remarques.
B) Dose optimum.
Discussion.

IV. — Éléments minéraux.

V. — Substrats.
1° Carbone.
2° Azote.

VI. — Validité du milieu.

VII. — Conclusion.

(1) Avec la collaboration technique de Melle H. HAMY.

I. — INTRODUCTION

Le problème qui se pose à l'origine de tout travail bactériologique est celui du milieu de culture qui va permettre l'obtention des microorganismes. Des milieux aussi complexes que des extraits de plantes ou des secrétions animales sont souvent une solution valable. Mais si l'on se propose une étude du métabolisme bactérien, il y a lieu de s'adresser, dans toute la mesure du possible, à un milieu composé d'espèces chimiques connues. C'est cette préoccupation qui a conduit à l'étude des milieux de culture synthétiques.

Les travaux portant sur les bactéries symbiotiques des légumineuses n'échappent pas à ces impératifs de recherche pure. De plus, la production en grande quantité de ces microorganismes pour les besoins de l'agriculture exige un milieu défini et équilibré, afin que l'utilisation des substrats carbonés et azotés soit totale et que l'on obtienne, d'une manière reproductible, le maximum de bactéries dans un parfait état physiologique.

Or, contrairement à bon nombre de microbes, pour lesquels il n'a pas été difficile de trouver un milieu synthétique assurant la perpétuité des souches, le cas de Rhizobium s'est avéré plus ardu.

Les Rhizobium ont d'abord été cultivés, après leur isolement par BEIJERINCK en 1888, sur des milieux constitués d'extraits de plantes complémentés ou non de substrats carbonés et azotés : extraits de luzerne avec glucose et gélatine (1), extraits de haricots avec saccharose (2), infusions de haricots ou de feuilles de vesce avec peptone et glucose ou saccharose (3).

NEUMANN (4) n'a pas essayé moins de 70 milieux à base d'extraits végétaux et d'extraits de sol. Mais, la nécessité d'un milieu défini étant bien reconnue, chaque auteur utilisa une formule minérale personnelle, qui exclut en fait les facteurs de croissance (5, 6, 7, 8, 9, 10, 11). Cependant, au bout d'un très petit nombre de repiquages, le Rhizobium n'est plus capable de pousser sur ces milieux, ce qui prouve que d'autres constituants sont nécessaires, et tous ces auteurs reviennent aux extraits de légumineuses diverses ; seul WERKMAN (12) a pu multiplier Rhizobium sur milieu synthétique sans avoir volontairement ajouté de facteurs de croissance.

WRIGHT (13) proposa l'eau de levure pour apporter ces facteurs de

croissance — et également comme source d'azote — et la formule du milieu de culture qu'il utilisa est demeurée d'un emploi courant (WAKSMAN 14, POCHON et coll. 15). ALLISON (16), WALKER et coll. (17) confirmèrent le caractère indispensable des composés organiques présents dans les extraits végétaux. La nécessité d'un facteur de croissance fut finalement démontrée (18, 19). Ce composé, d'abord appelé Coenzyme R (20, 21) fut ensuite identifié à la biotine (22).

Cependant tous les Rhizobium n'ont pas les mêmes besoins en biotine, et les différentes souches d'une même espèce semblent pouvoir se comporter diversement. De là, selon WILSON et WILSON (23) la division des bactéries des nodules des légumineuses, en trois catégories :

— les souches qui ne poussent qu'en présence de biotine,

— les souches qui, en son absence donnent une faible croissance,

— enfin les souches, rares, qui se développent bien sans que la biotine soit présente.

On peut raisonnablement admettre qu'il n'y a pas lieu de retenir la deuxième catégorie ; la concentration optimum peut être très faible et l'expérimentation est dans ce cas rendue délicate du fait de l'impureté des produits et des traces de facteurs de croissance apportés par l'inoculum.

Récemment, JORDAN (24) étudiant le métabolisme de Rhizobium meliloti, a vu dans les acides aminés les facteurs de croissance essentiels, et il ne reconnaît pas le caractère indispensable de la biotine.

Les autres vitamines du complexe B n'ont pas suscité moins de travaux, et les conclusions sont également divergentes. La thiamine, bien que synthétisée par Rhizobium, est généralement reconnue comme favorable (21, 22, 25, 26, 27). Pourtant certains la considèrent comme sans action (24, 28, 29). La riboflavine, synthétisée elle aussi, est tenue soit comme indispensable à l'état de trace (21, 22, 25, 27), soit comme inutile (24). L'acide pantothénique, essentiel pour certains auteurs (21, 22), n'est pas un facteur de croissance pour d'autres (24, 30). LILLY et LEONIAN (31) ont essayé de relier l'action de sept vitamines (thiamine, acide pantothènique, inositol, pyridoxine, acide nicotinique, riboflavine, acide para-aminobenzoïque) aux conditions de culture : ces substances, synthétisées par Rhizobium, semblent des facteurs accessoires qui augmentent la vitesse et le taux de croissance suivant la composition du milieu (richesse en fer), le degré d'aération (cultures agitées ou non), et la température (25 ou 30°).

La vitamine C a été dite sans effet sur la croissance (24,28), ou au contraire reconnue favorable (32).

Parmi les acides aminés, la cystéine a retenu l'attention pour ses propriétés réductrices (34). JORDAN (24, 35) estime que ce sont des composés indispensables à la croissance de Rhizobium meliloti, et que

l'eau de levure agit, non par ses vitamines, mais par les acides aminés qu'elle contient (sans exclure d'ailleurs l'existence possible de composés non identifiés importants).

Les constituants minéraux des milieux de culture pour Rhizobium ont fait l'objet d'un petit nombre de travaux et si la nature des sels et leur concentration varient quelque peu suivant les auteurs, on n'en trouve aucune justification. ALLISON (16), WILSON et WILSON (23), FRAILE (36), proposent des formules diverses. L'action du fer a notamment été étudiée (31, 37) et STEINBERG (38) a montré que Fe, Mn, Mo et Ca sont indispensables. Le magnésium, présent dans tous les milieux (comme les phosphates) est, selon NORRIS (39), le cation bivalent nécessaire à Rhizobium, alors que le calcium deviendrait toxique à de faibles concentrations.

La question des besoins nutritifs de Rhizobium et tout spécialement les exigences en facteurs de croissance demeure donc, étant donné les opinions souvent opposées, un sujet de discussion et de travail. Les conclusions divergentes des travaux cités en référence tiennent, semble-t-il, à deux causes :

1° La multiplicité de modalités expérimentales. En effet, les inoculums, plus ou moins abondants, sont lavés ou non ; les cultures sont conduites pendant des durées variables ; les mesures de croissance sont parfois faites avec une grande imprécision.

2° L'interprétation des résultats : les études sur les besoins nutritifs portent sur quelques souches, et on a pensé pouvoir appliquer les résultats au genre Rhizobium. Or, rien ne permet une telle extrapolation ; il n'est pas exclu en effet, que telle propriété biochimique (par exemple l'exigence en biotine) soit un caractère spécifique , au même titre que la faculté d'entrer en symbiose avec une légumineuse déterminée. D'autre part, les mesures de croissance donnent parfois des résultats avec une précision n'autorisant pas d'affirmer que les différences obtenues sont significatives. Enfin, et surtout, il y a le caractère subjectif de la notion de croissance bonne ou mauvaise, rapide ou lente. Tel auteur estime qu'un léger louche suffit à dire qu'il y a croissance, qu'un autre juge négligeable. Ce dernier point semble entrer pour beaucoup dans des opinions contradictoires.

Notre dessein, dans le présent travail, a été la mise au point d'un milieu de culture contenant les seuls éléments nécessaires pour couvrir les besoins nutritifs de Rhizobium meliloti, en nous référant constamment à la croissance obtenue en présence d'eau de levure apportant tous les facteurs de croissance nécessaires.

D'où l'étude des points suivants :

— le développement de Rhizobium meliloti est-il sous la dépendance d'un ou plusieurs facteurs de croissance, vitamine ou acide aminé ?

— quels éléments minéraux doivent entrer dans la composition du milieu de culture ?

— quelles sont les concentrations optimum de ces constituants organiques et minéraux ?

— quels substrats carbonés ou azotés peuvent être utilisés de façon satisfaisante ?

II. — MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

1° Préparation et stérilisation des milieux.

Les produits utilisés pour la préparation des milieux de culture ont les caractéristiques suivantes :

a) Les sels minéraux : qualité RP, de Rhône-Poulenc.

b) Les substrats carbonés : produits purs cristallisés, Rhône-Poulenc.

c) Les vitamines : produits biochimique de Hoffmann. La Roche et Cie.

d) Les acides aminés : produits Rhône-Poulenc.

e) Les solutions, et les suspensions microbiennes se font dans de l'eau permutée distillée.

f) L'eau de levure est préparée en faisant bouillir une suspension de 100 g de levure de bière séchée en poudre dans 1 l d'eau, puis en filtrant.

Les milieux de culture sont répartis dans des tubes de 22 × 220 à raison de 5 ml par tube. Ils sont stérilisés à l'autoclave à 110° pendant 15 minutes ; les vitamines thermolabiles sont stérilisées séparément sur filtre Chamberland L 5.

2° Souches.

La souche employée dans les essais préliminaires est Rhizobium meliloti S 22 que nous devons à l'obligeance de Messieurs BONNIER et MANIL de l'Institut Agronomique de Gembloux.

Douze souches isolées à notre laboratoire ont été ensuite testées sur le milieu mis au point.

3° Ensemencement des tubes de culture.

La préparation de l'inoculum est conduite comme suit :

Les microbes ayant poussé pendant 48 heures à 30° sur milieu à l'eau de levure gélosée sont récoltés, lavés deux fois par centrifugation, remis en suspension à une concentration d'environ 1 mg de microbes, poids sec, par ml. On laisse reposer 10 minutes pour que les petits agrégats se décantent. La suspension homogène est alors amenée à une concentration de 0,4 mg/ml de microbes, poids sec : c'est cet inoculum qui est réparti à raison de 0,1 ml par tube de culture.

4° Incubation.

Les tubes de culture sont placés dans une étuve à 30°C, inclinés à 20° sur l'horizontale, sur un secoueur vibrant horizontalement à une fréquence de 100 périodes par minute, avec une amplitude de 6 cm. Au bout de 48 heures on procède aux lectures.

5° Mesure de la croissance.

On introduit dans chaque tube de culture 1 ml d'une solution d'acide citrique à 80 p. 100 pour faire passer en solution les phosphates précipités (il est tenu compte de cette dilution dans le calcul de la croissance).

On mesure alors l'opacité de la suspension microbienne au moyen de l'électrocolorimètre JOBIN et YVON, à une longueur d'onde de 630 mμ [1]

Les chiffres lus au colorimètre sont convertis en poids sec de microbes par ml de culture à l'aide d'une courbe donnant en fonction de l'opacité, le poids sec en mg/ml d'une suspension de Rhizobium S 22 dans l'eau pure.

6° Contrôle de pureté.

La pureté de l'inoculum et celle de la culture obtenue sur les différents milieux, est vérifiée par examen microscopique, et dans un certain nombre de cas, par étalement en boîte de Pétri sur milieu à l'eau de levure gélosée.

III. — FACTEURS DE CROISSANCE

A. — Détermination des facteurs de croissance essentiels.

1° Milieu de base.

Dans cette série d'essais, nous utilisons le milieu minéral mis au point par N. GRELET (40) auquel sont ajoutés mannite et sulfate d'ammonium :

PO_4H_2K	2,26 g	Tampon $\frac{M}{20}$ pH = 7,0
PO_4HNa_2, 12 H_2O	11,94 g	
SO_4Mg, 7 H_2O	0,123 g	
SO_4Fe, 7 H_2O	0,028 g	
SO_4Zn	0,016 g	
SO_4K_2	0,174 g	
Cl_2Ca, 2 H_2O	0,147 g	
Mannitol	18,2 g	
$SO_4(NH_4)_2$	6,60 g	
Eau	q.s.p.f. 1 litre	

[1] Bien que les tubes témoins contenant de l'eau de levure présentent une légère coloration jaune, il est inutile d'ajouter un colorant dans les autres milieux, la précision des essais étant inférieure à l'écart de lecture provenant de cette coloration.

2° **Facteurs de croissance.**

Nous avons essayé aux concentrations indiquées les facteurs de croissance suivants :

a) *Vitamines* :

Thiamine (B_1)	0,2 µg/ml
Riboflavine (B_2)	0,2 µg/ml
Pantothénate de Na	0,2 µg/ml
Biotine	5 mµg/ml
Pyridoxine (B_6)	0,2 µg/ml
Vitamine B_{12}	10 mµg/ml
Acide folique	10 mµg/ml
Acide para-aminobenzoïque	10 mµg/ml
Acide nicotinique	0,2 µg/ml
Acide ascorbique	1 µg/ml

b) *Acides aminés* :

L-histidine monochlorhydrate	20 µg/ml
L-cystéine monochlorhydrate	20 µg/ml
DL-méthionine	20 µg/ml

c) *Témoins* :

Dans tous les cas nous avons effectué deux témoins :

— l'un sans facteur de croissance (milieu de base seul),

— l'autre en enrichissant le milieu de base avec 10 p. 100 d'eau de levure (essais de référence).

3° **Résultats.**

Les croissances moyennes obtenues avec les divers facteurs de croissance sont rapportées dans le tableau I ci-dessous. Chaque essai a été reproduit au moins quatre fois échelonnées dans le temps et le plus souvent six fois.

TABLEAU I

Culture obtenue en 48 h en présence de différents facteurs de croissance.

Facteurs de croissance	Croissance poids sec par ml, en mg
Témoin sans facteur de croissance	0,05
Eau de levure	5,0
Thiamine (B_1)	0,06
Pyridoxine (B_6)	0,06
Vitamine B_{12}	0,06
Biotine	1,6
Biotine + Thiamine	1,4
B_1, B_6, B_{12}, biotine	1,3
B_1, B_2, B_6, B_{12}, C, biotine, pantothénate Na, acides folique, para-aminobenzoïque, nicotinique	1,4
L histidine, L cystéine, DL méthionine	0,08
L histidine, L cystéine, DL méthionine, biotine	1,5
L histidine, L cystéine, DL méthionine, biotine, thiamine	1,5

4° Discussion.

L'examen des résultats appelle les remarques suivantes :

a) Les acides aminés testés sont ceux que JORDAN (24, 35) reconnaît comme facteurs de croissance pour le plus grand nombre de souches. Ils sont cependant incapables d'assurer la croissance de Rhizobium S 22.

b) L'eau de levure à la concentration de 10 p. 100, joue un rôle non seulement par les facteurs de croissance qu'elle apporte mais encore comme substrat carboné et azoté. Ceci explique partiellement la croissance plus importante sur le milieu renfermant de l'eau de levure : celle-ci utilisée seule, sans substrat carboné, donne en effet une croissance de l'ordre de 1 mg/ml.

c) Pour l'eau de levure exceptée, la croissance se produit seulement lorsque la biotine est présente.

d) Il n'y a pas de différence significative entre les cultures obtenues avec biotine seule, ou avec biotine plus une autre vitamine ou un acide aminé. La biotine est donc le seul facteur indispensable à la croissance de Rhizobium S 22.

e) Il est nécessaire de rechercher l'influence d'autres facteurs (sels minéraux) afin d'obtenir sur le milieu synthétique une croissance identique à celle qui se produit en présence de l'eau de levure.

B. — Concentration requise en biotine.

Ayant mis en évidence le besoin en biotine, nous avons tenté d'en déterminer l'optimum de concentration.

Dans un premier essai, les doses ont varié de 0 à 20 mμg/ml. Le tableau II donne les croissances observées.

TABLEAU II

Croissance en fonction de la concentration en biotine.

Concentration de biotine en mμg/ml	0	0,1	1	3	6	9	10	12	20
Croissance poids sec en mg/ml	0,05	0,3	1,3	1,6	1,6	1,7	1,4	1,5	1,5

Il ressort du tableau ci-dessus que pour des concentrations supérieures à 3.10^{-9} la croissance est sensiblement constante.

Des essais ultérieurs, sur milieu définitivement mis au point, ont montré que des concentrations atteignant 0,5 μg/ml n'avaient pas d'effet toxique. Cette plage de variation de 0 à 500 mμg/ml n'a pas permis de montrer l'existence d'un optimum. Cependant, pour le but que nous poursuivons, il suffit de savoir que la concentration 10^{-8} est convenable.

IV. — ÉLÉMENTS MINÉRAUX

Les essais suivants ont pour but de déterminer les concentrations optimum des éléments minéraux.

Pour chaque constituant — à l'exception du tampon phosphate — il a été essayé des doses croissantes. Les autres éléments du milieu sont ceux qui ont été précédemment utilisés.

Dans tous les cas le milieu minéral étudié est complété par :

Mannitol	18,2 g/l
$SO_4(NH_4)_2$	6,6 g/l
Biotine	10 µg/l

Les tableaux suivants donnent la moyenne des résultats obtenus pour chaque sel.

TABLEAU III

Besoins en Zn.

SO_4Zn	Concentration	0	10^{-5} M	10^{-4} M	10^{-3} M
	Croissance poids sec mg/ml	4,9	4,8	4,3	3,9

TABLEAU IV

Besoins en Mg.

$SO_4Mg, 7H_2O$	Concentration	0	5.10^{-5} M	5.10^{-4} M	5.10^{-3} M
	Croissance poids sec mg/ml	1,1	2,3	4,3	3,4

TABLEAU V

Besoins en soufre.

SO_4K_2	Concentration	0	10^{-4} M	10^{-3} M	10^{-2} M
	Croissance poids sec mg/ml	5,5	4,2	4,3	3,5

TABLEAU VI

Besoins en Ca.

$Cl_2Ca, 2H_2O$	Concentration	0	10^{-4} M	10^{-3} M	10^{-2} M
	Croissance poids sec mg/ml	3,5	4,9	4,3	0,8

TABLEAU VII

Besoins en Fe.

$SO_4Fe, 7H_2O$	Concentration	0	10^{-6}M	10^{-5}M	10^{-4}M	5.10^{-4}M	10^{-3}M	5.10^{-3}M	10^{-2}M
	Croissance poids sec mg/ml	0,8	2,3	3,3	4,3	4,4	2,8	0,3	0,1

Les tableaux III à VII montrent que :

1° SO_4K_2 et SO_4Zn provoquent une légère dépression de croissance même à faible concentration. Nous ne devons pas en conclure cependant que Rhizobium S 22 ne requiert pas de petites quantités de ces différents ions:

a) Les autres sulfates fournissent le soufre.

b) Le tampon phosphaté apporte K^+ (et Na^+).

2° $SO_4Mg, 7H_2O$ est nécessaire à la concentration 8.10^{-4}M,

3° L'optimum en $Cl_2Ca, 2H_2O$ est 10^{-4}M.

4° L'observation de besoins relativement importants en Mg rejoint les conclusions de NORRIS (39). Toutefois, si les exigences en calcium sont faibles, la concentration optimum ne produisant qu'une petite augmentation de la croissance par rapport à la dose 0, nous ne pouvons en conclure, comme cet auteur, que Ca soit toxique. Il est possible en effet que l'inhibition par Ca soit due à l'élimination des phosphates qui précipitent abondamment dans ces conditions.

5° La concentration optimum que nous observons pour le fer est 2, 8. 10^{-4}M.

THORNE et WALKER (37) ont montré que le fer est plus favorable sous forme oxydée (Cl_3Fe) que sous forme réduite (SO_4Fe). Dans les conditions d'aérobiose où nos cultures sont faites, il n'est pas douteux qu'une telle distinction soit superflue, Fe^{++} passant très rapidement à l'état Fe^{+++}. Ces auteurs trouvent un optimum de 10 p.p.m. en fer, soit 50 mg de $SO_4Fe, 7H_2O$ par litre, peu inférieur à ce que nous obtenons (78 mg/l).

Il faut faire ici la même remarque que pour Ca : l'inhibition observée pour des concentrations supérieures peut avoir pour cause l'élimination d'une importante partie des phosphates sous forme insoluble et non nécessairement une toxicité du fer.

V. — SUBSTRATS CARBONÉS ET AZOTÉS

Plusieurs sources de carbone et d'azote ont été essayées.

1° Le carbone a été fourni sous forme de glucose, mannitol, lactose et saccharose à la dose uniforme de 2 p. 100, soit sensiblement la même quantité de C.

On obtient les croissances moyennes suivantes après 48 h :

Glucose : 5,1 mg de poids sec par ml ;

Mannitol : 4,6 mg de poids sec par ml ;

Saccharose : 4,3 mg de poids sec par ml ;

Lactose : 2,0 mg de poids sec par ml.

Ces sucres sont tous métabolisés, à des vitesses différentes. Il n'y a donc pas lieu de recourir au mannitol, produit cher, pour la production de Rhizobium, puisque le glucose ou le saccharose sont plus économiques.

Nous avons constaté d'autre part, que l'acide succinique est métabolisé avec une forte alcalinisation du milieu.

2° L'azote a été apporté dans les milieux sous forme :

NO_3K	10 g/l
$SO_4(NH_4)_2$	6,6 g/l

La forme nitrique est peu favorable à la croissance, elle s'accompagne d'une faible élévation de pH. La forme ammoniacale est au contraire bien utilisée, le pH devenant fortement acide.

3° L'acide glutamique a été essayé à la dose de 14,7 g/l. Il assure la même croissance que l'acide succinique avec alcalinisation.

VI. — VALIDITÉ DU MILIEU

Les précédents essais aboutissent à définir comme suit un milieu de culture entièrement synthétique pour Rhizobium meliloti S 22 :

Tampon PO_4 $\frac{M}{20}$ pH = 7,0	PO_4H_2K	$16{,}6.10^{-3}$M	2,268 g
	PO_4HNa_2, $12H_2O$	$33{,}3.10^{-3}$M	11,940 g
	SO_4Fe, $7H_2O$	$2{,}8.10^{-4}$M	78 mg
	SO_4Mg, $7H_2O$	8.10^{-4}M	197 mg
	Cl_2Ca, $2H_2O$	10^{-4}M	15 mg
	Biotine	5.10^{-8}M	12 µg
	Glucose	10^{-1}M	18 g
	$SO_4(NH_4)_2$	5.10^{-2}M	6,6 g
	Eau		q.s.p.f. 1 litre

On a recherché la validité de ce milieu pour les diverses souches de Rhizobium meliloti isolées à notre laboratoire, et on a comparé les croissances obtenues sur ce milieu :

1° avec celles que donne le milieu de WRIGHT à l'eau de levure (4).

2° avec celles obtenues sur notre milieu renfermant au lieu de 1,8 p. 100 de glucose, 1 p. 100 de mannite comme le milieu de WRIGHT.

Le tableau VIII donne la moyenne de trois répétitions sur chaque milieu au bout de 36 heures de culture.

Il montre que le milieu synthétique glucosé est valable pour toutes les souches. La croissance aussi importante qu'en présence d'eau de

(1) Composition du milieu de Wright : Mannitol 10 g ; ClNa 0,2 g ; PO_4HK_2 0,5 g ; SO_4Mg, $7H_2O$ 0,2 g SO_4Ca, $2H_2O$ 0,1 g ; CO_3Ca 1,0 g ; Eau de levure 100 cm^3 ; Eau q.s.p.f. 1 litre.

levure, s'accompagne d'une production faible de polysaccharides. L'examen microscopique révèle que la formation de bactéroïdes en T ou en L est également faible. Le pH, initialement à 7,0, s'abaisse à 5,3-5,5.

TABLEAU VIII

Croissance comparée de 13 souches de Rhizobium meliloti sur milieu de Wright et milieu synthétique. Culture de 36 heures.

Souches	Croissance sur milieu de Wright. Poids sec mg/ml	Croissance sur milieu synthétique mannitol 1 %. Poids sec mg/ml	Croissance sur milieu synthétique glucose 1,8 %. Poids sec mg/ml
S 22	2,6	3,4	3,0
Sa 1	3,8	3,3	5,8
Sa 4	2,3	4,9	5,4
Sa 6	1,8	5,1	5,7
Sa 10	2,7	5,0	5,5
Sa 11	2,2	4,0	5,2
Sa 14	3,0	4,5	4,3
V 3	2,0	3,8	5,3
V 4	2,6	3,5	6,5
V 7	2,9	3,7	5,3
V 8	1,4	3,5	5,2
V 13	2,7	4,6	5,2
V 14	2,7	3,9	4,9

VII. — CONCLUSION

Le présent travail a permis de mettre au point un milieu de culture entièrement défini pour Rhizobium meliloti S 22 et douze autres souches de la même espèce.

Nous avons été amenés à choisir la croissance sur milieu à l'eau de levure comme référence pour deux raisons :

1° Afin que tous les facteurs entrant en jeu soient définis et puissent être comparés.

2° Pour avoir l'assurance que le milieu synthétique donne (dans le même temps) une quantité de microbes au moins égale pour une même quantité de substrat.

Notre but était en effet non pas une étude théorique approfondie des besoins nutritifs de quelques souches, mais la possibilité de produire des microorganismes, tant pour les travaux au laboratoire que pour la fabrication de quantités importantes en vue de l'inoculation des luzernières.

Ce milieu synthétique, d'un emploi commode, puisqu'il peut être stérilisé à l'autoclave sans perdre de ses qualités, est utilisé par nous depuis six mois : il assure la croissance indéfinie de nos souches de Rhizobium meliloti, et peut être avantageusement substitué à un milieu à l'eau de levure.

S'il est possible que des besoins particuliers se fassent jour pour d'autres souches, ce milieu semble néanmoins susceptible de donner satisfaction dans la majorité des cas.

Reçu pour publication le 6 *avril* 1959.

RÉSUMÉ

Après un rappel des principaux travaux consacrés aux besoins nutritifs de Rhizobium, les A. montrent que seule la biotine est nécessaire à la croissance de Rhizobium meliloti S 22 et déterminent la concentration optimum en sels minéraux. Ils donnent en conclusion la formule d'un milieu de culture synthétique entièrement défini valable pour d'autres souches de Rhizobium meliloti.

SUMMARY

A synthetic nutrient culture for Rhizobium meliloti.

The principal works relating to the nutrient requirements of Rhizobium are reviewed. It is shown that biotine alone is required for the growth of Rhizobium meliloti S22, and the optimum concentration of mineral salts is determined. The composition is given of a synthetic nutrient culture suitable also for other strains of Rhizobium meliloti.

ZUSAMMENFASSUNG

Eine synthetische Nährlosung für Rhizobium meliloti.

Nach einem Rückblick auf die wichtigsten Arbeiten über die Ernährungsbedürfnisse des Rhizobium, wird von den Autoren gezeigt, dass nur das Biotin zum Wachstum des Rhizobium meliloti S22 notwendig ist. Die Autoren bestimmen auch die optimale Mineralsalzkonzentration. Als Schlussfolgerung geben sie die Formel einer synthetischen, wohl bestimmten und für andere Rhizobium meliloti Stämme anwendbaren Nährlösung.

Синтетическая среда для культуры Rhizobium Meliloti.

ФЕРРИ, БЛЯШЕР, ОБАТОН. Версаль.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Сделав обзор главных работ касающихся необходимого для Ризобия питания, авторы доказывают, что одно лишь вещество необходимо для развития Rhizobium Meliloti S 22 : « la biotine », и определяют оптимальную концентрацию минеральных солей. В заключение, они дают формулу синтетической среды, вполне определенной, годной для других разновидностей Rhizobium Meliloti.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) STUTZER, BURRI, MAUL. — Untersuchungen über das Anpassungsvermögen von Bacillus radicicola an einem fremden Nährboden. *Centr. f. Bakt. II Abt.*, **2**, 665, 1896.

(2) MAZÉ. — Fixation de l'azote libre par le bacille des nodosités des légumineuses. *Ann. Inst. Pasteur*, **11**, 44, 1897.

(3) DE ROSSI. — Uber die Mikroorganismen welche die Wurzelknöllchen der Leguminosen erzeugen. *Centr. f. Bakt. II Abt.*, **18**, 289, 1907. Uber die Fixierung des elementaren Stickstoff in den reinen Kulturen. *Annali di Botanica* 1909 et abstract de l'auteur dans *Centr. f. Bakt. II Abt.*, **26**, 270, 1910.

(4) NEUMANN. — Die Bakterien der Wurzelknöllchen der Leguminosen. *Landw. Vers. Sta.*, **56**, 187-202, 1902.

(5) BUCHANAN. — The gum produced by Bacillus radicicola. *Centr. f. Bakt.*, II *Abt*, **22**, 371-396, 1909.

(6) BUCHANAN. — The bacteroïds of bacillus radicicola. *Centr. f. Bakt.*, II *Abt.*, **23**, 59-91, 1909.

(7) HARRISON, BARLOW. — The nodule organism of the leguminosae ; its isolation, cultivation, identification and commercial application. *Centr. f. Bakt.*, II *Abt.*, **19**, 264, 1907.

(8) ZIPFEL. — Beitrage zur Morphologie und Biologie der Knöllchenbakterien der Leguminosen. *Centr. f. Bakt.*, II Abt., **32**, 97-137, 1911.

(9) FRED and LOOMIS. — Influence of hydrogen-ion concentration of medium on the reproduction of alfalfa bacteria. *J. Bact.*, **2**, 629, 1917.

(10) ASHBY. — *Jour. Agr. Sci.*, **2**, 35-51, 1907.

(11) PERCIVAL. — Agricultural Bacteriology, 1920. Duckworth and Co. London.

(12) WERKMAN. — Continuous reproduction of microorganisms in synthetic media. *Science*, **62**, 115, 1925.

(13) WRIGHT (W. H.). — The nodule bacteria of soybeans. I. Bacteriology of strains. *Soil Science*, **20**, 95-129, 1926.

(14) WAKSMANN. — Principles of Soil Microbiology - 2 nd. Edit. 1931, Baillière, Tindall and Co - London.

(15) POCHON et al. — Manuel technique d'analyse microbiologique du sol. Masson, Éd. Paris, 1954.

(16) ALLISON. — The growth of Bacillus radicicola on artificial media containing various plant extracts. Jal *of Agric. Research*, **35**, 915-924, 1927.

(17) WALKER, ANDERSON and BROWN. — Physiological studies on Rhizobium. I. The effect of nitrogen source on oxygen consumption by Rhizobium leguminosarum Frank. *Soil Science*, **37**, 387, 1934.

(18) ALLISON, HOOVER and BURK. — A respiration cœnzyme. *Science*, **78**, 217, 1933.

(19) ALLISON and HOOVER. — An accessory factor for legume nodule bacteria, sources and activity. *J. Bact.*, **27**, 561, 1934.

(20) ALLISON and MINOR. — Cœnzyme R requirements of Rhizobia. *Soil Science*, **46**, 473, 1938.

(21) WEST and WILSON. — Growth factors requirements of the root nodule bacteria. *J. Bact.*, **37**, 161, 1939.

(22) WEST and WILSON. — Biotin as a growth stimulant of the root nodule bacteria. *Enzymologia*, **8**, 152, 1940.

(23) WILSON and WILSON. — Biotin as a growth factor for Rhizobia. *J. Bact.*, **43**, 329, 1942.

(24) JORDAN. — Studies on the legume root nodule bacteria. III. Growth factors requirements for effective, ineffective and parasitic strains. *Canad. J. Botany*, **30**, 693, 1952.

(25) NILSSON, BJÄLFVE und BURSTRÖM. Uber Zuwachsfaktoren bei Bact. radicicola. II. *Ann. d. landwirtsch. Hochschule Swedens*, **6**, 299, 1938.
(26) WEST and WILSON. — Biological determination of vitamin B_1 (Thiamine) in Rhizobium trifolii. *Science*, **88**, 334, 1938.
(27) WEST and WILSON. — Synthesis of growth factors by Rhizobium trifolii. *Nature*, **142**, 397, 1938.
(28) LAIRD and WEST. — The influence of bios on nodule bacteria and legumes. B. Influence of crude bios preparations on acid production by strains of Rhizobium trifolii. *Canad. J. Research.*, **16**, 347, 1938.
(29) NIELSEN und JOHANSEN. — Untersuchungen über biologische Stickstoffbindung. V. — Untersuchungen über die Wirkung verschiedener Wuchstoffe auf 4 Stämme von B. radicicola. *Compt. rend. Trav. Lab. Carlsberg. Sér. physiol*, **23**, 173, 1941.
(30) MCBURNEY and WILLIAMS. — Pantothenic acid and the nodule bacteria legume symbiosis. *Proc. Nat. Acad. Sci. U. S.*, **21**, 301. 1935.
(31) LILLY and LEONIAN. — The interrelationship of iron and certain accessory factors in the growth of Rhizobium trifolii strain 205. *J. Bact.*, **50**, 383, 1945.
(32) DEMOLON. — Contribution à l'étude de la symbiose bactérienne chez les légumineuses. *Rev. Géné. Botan.*, **58**, 488 (562 et 567) 1951.
(33) ALLYN and BALDWIN. — The effect of the oxidation-reduction character of the medium on the growth of an aerobic form of bacteria, *J. Bact.*, **20**, 417, 1930.
(34) ALLYN and BALDWIN. — Oxidation-reduction potentials in relation to the growth of an aerobic form of bacteria. *J. Bact.*, **23**, 369, 1932.
(35) JORDAN. — Observations on the effect of amino-acids on the growth initiation of Rh. meliloti, with special reference to the synthesis of alanine from pyruvate and ammonium ions. *Canad. J. Microbiol.*, **3**, 911, 1957.
(36) FRAILE. — Estudio sobre nodulo bacteria I. *Microbiologia española*, **8**, 55, 1955.
(37) THORNE and WALKER . — Physiological studies on Rhizobium. VI. Accessory factors. *Soil Science*, **42**, 231, 1936.
(38) STEINBERG. — Applicability of nutrient solution purification to the study of trace-element requirements of Rhizobium and Azotobacter. *J. Agri. Research.*, **57**, 461, 1938.
(39) NORRIS. — Rhizobium needs magnesium, not calcium. *Nature*, **182**, 734, 1958.
(40) GRELET (N.). — Le déterminisme de la sporulation chez Bacillus megatherium. Thèse Paris, 1951.

Le Directeur-Gérant : B. LACLAVIÈRE.

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 22-9-1959.

Dépôt légal : 3e trimestre 1959 *N° d'impression : 542*

631.48.

LA NOTION D'AGE DU SOL
SON APPLICATION A QUELQUES EXEMPLES RÉGIONAUX

PAR

B. GÈZE

Laboratoire d'Agrogéologie, Institut National Agronomique, Paris.

INTRODUCTION

Voici déjà longtemps qu'avec d'autres auteurs j'insiste sur l'importance de la distinction entre les paléo-sols et les sols dus à l'évolution actuelle (1). Il est d'ailleurs encourageant de constater que des pédologues, de plus en plus nombreux, se penchent maintenant sur ces problèmes au lieu de les considérer comme mineurs : la lecture des comptes rendus du VIe Congrès de la Science du Sol le démontre amplement. Cependant, beaucoup d'entre eux envisagent seulement les influences des divers climats du Quaternaire dans la genèse des sols heureusement qualifiés de « polyphasés » par L. GLANGEAUD (2).

Je voudrais montrer ici que la question est en réalité beaucoup plus complexe et qu'il est souvent nécessaire d'avoir une connaissance complète de l'histoire géologique de chacune des régions dont les sols sont étudiés. Je voudrais souligner aussi qu'une telle préocupation ne semble pas vaine car elle présente des conséquences aussi bien théoriques que pratiques.

La paléopédologie peut être considérée comme une branche de la géologie historique car elle contribue à la reconstitution des paléo-climats et de la paléogéographie, sous la réverve, malheureusement importante, que l'on arrive à connaître parfaitement les conditions actuelles pour la genèse de chacun des types de sols décrits dans la pédologie classique. La paléopédologie peut aussi aider à la compréhension de la genèse de certains types de roches et se rattacher alors à la géologie générale (3). Depuis quelques années les pétrographes commencent à s'en rendre compte et reconnaissent que, si les progrès de l'océanographie entraînent de nouvelles conceptions pour la sédimentation marine, ceux de la pédologie

transforment l'explication de bien des phénomènes de sédimentation sur les continents ou sur les marges littorales.

Du point de vue pratique, il ne faut pas oublier que les façons agricoles et les méthodes de cultures doivent différer suivant que l'on a affaire à un sol dont la tendance évolutive actuelle est bien connue ou à un paléo-sol qui tantôt se trouve figé et ne peut plus évoluer, tantôt évoluera encore dans des conditions très particulières (cas spécialement importants des carapaces latéritiques, croûtes calcaires et alios fossiles que l'on peut briser parfois sans qu'ils se reconstituent aussitôt).

Avant de citer un certain nombre d'exemples régionaux destinés à illustrer mon propos, je crois utile d'indiquer la façon dont il me semble logique de classer les sols en fonction de leur âge. La justification de cet essai sera précisément donnée par les exemples envisagés.

Un essai analogue a été rédigé par W. L. KUBIENA (Zur Methodik der Paläopedologie, *Actes VIe Congr. Intern. Quaternaire*, Rome-Pise, 1953, t. 1, p. 297) qui a distingué, avec exemples pris dans une région basaltique de l'Europe centrale :

1° Formations de sols autochtones sur roches-mères primaires : *a*) récentes : *b*) relictes : *c*) fossiles.

2° Sédiments de sols : *a*) récents ; *b*) relictes ; *c*) fossiles.

3° Formations de sols autochtones sur sédiments de sols : *a*) récents *b*) relictes ; *c*) fossiles.

4° Formes d'évolution autochtones sur sols relictes autochtones : *a*) récentes ; *b*) relictes ; *c*) fossiles.

Le principe que je propose diffère seulement en ce sens que je n'envisage pas ici le cas des formations colluviales ou résiduelles parautochtones, donc les 2e et 3e catégories de Kubiena. Par contre, les subdivisions a, b, c de Kubiena correspondent assez exactement à mes catégories majeures : sols actuels, sols hérités, sols fossiles.

J'ai développé le point de vue de la classification en sols autochtones, parautochtones (ou résiduels) et allochtones (ou de transport) dans le chapitre sur l'altération des roches et la formation des sols inclus dans le volume « La Terre » (*Encyclopédie de la Pléiade*, Paris, Gallimard, 1959).

I. — CLASSIFICATION DES SOLS D'APRÈS LEUR AGE

1° Sols actuels.

Sols dont la genèse paraît avoir été commandée par les facteurs climatiques régnant actuellement dans le lieu où on les observe. La plupart seront donc postérieurs à la dernière glaciation quaternaire dans nos régions ou au dernier « pluvial » en Afrique (10 à 15 000 ans ?).

a) **Sols actuels non évolués** (Sols azonaux) : Généralement sols jeunes n'ayant pas eu le temps de « mûrir » (lithosols, sols sur alluvions récentes).

b) **Sols actuels évolués** (Sols zonaux et intrazonaux) : Sols « mûrs » climatiques décrits en pédologie classique. Ils sont toujours « monophasés », c'est-à-dire qu'ils ont subi l'influence d'une seule phase climatique, qui est la phase actuelle.

2° Sols hérités.

Sols résultant essentiellement d'une genèse sous l'influence de facteurs climatiques antérieurs à ceux qui règnent actuellement dans le

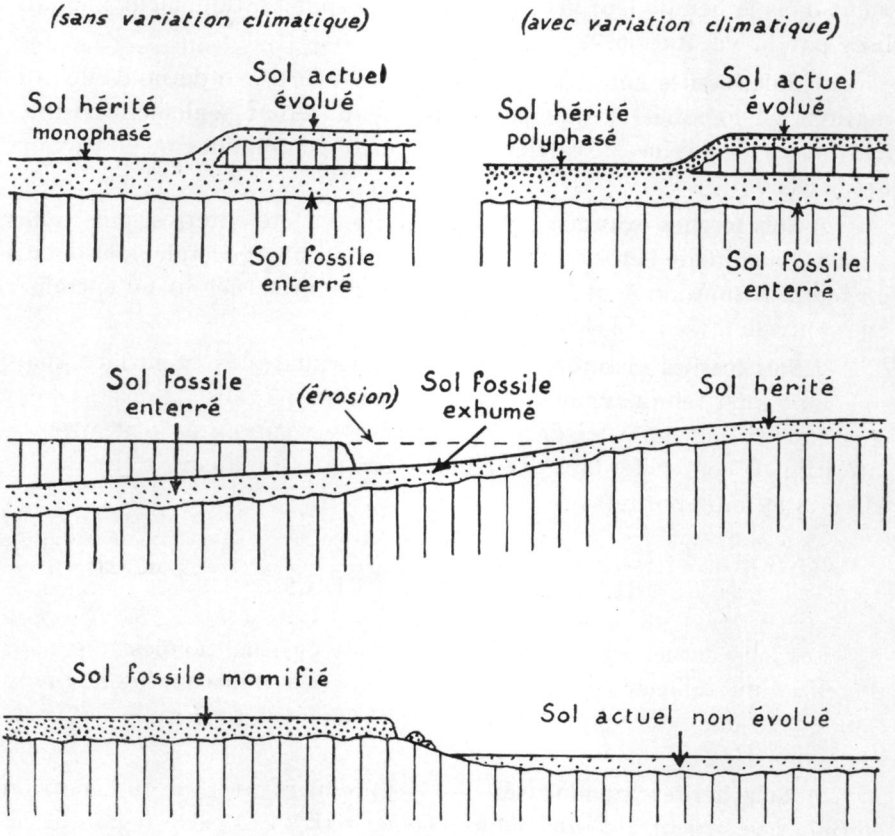


Schéma des relations entre sols hérités et sols fossiles.
Formations pédologiques en pointillés, formations géologiques en tiretés.

lieu où on les observe (paléo-sols), mais qui sont encore utilisés par la végétation.

a) **Sols hérités monophasés** : Paléo-sols qui n'ont pas cessé d'être soumis à des influences climatiques voisines de celles qui ont présidé à leur genèse et qui ont donc sensiblement conservé dans leur profil les caractères acquis depuis un temps qui peut avoir été très long.

b) **Sols hérités polyphasés** : Sols dont la partie héritée, tout en intervenant par ses propriétés physico-chimiques dans le bas du profil, est masquée dans les horizons supérieurs par une nouvelle évolution résultant de l'influence des facteurs climatiques actuels.

3° Sols fossiles.

Paléo-sols au sens strict, résultant uniquement d'une genèse sous l'influence de facteurs climatiques antérieurs à ceux qui règnent actuellement dans le lieu de leur gisement et qui ne sont pratiquement plus utilisés par la végétation.

a) **Sols fossiles enterrés** : Paléo-sols recouverts par de nouvelles formations géologiques et qui, par conséquent, seront seulement visibles à la faveur de ravins, de carrières, de tranchées profondes ou de travaux artificiels variés.

b) **Sols fossiles exhumés** : Paléo-sols qui ont été enterrés, puis remis à jour à la suite de l'érosion de la couche susjacente, généralement depuis un temps insuffisamment long pour que le climat actuel ait pu entraîner une nouvelle évolution des horizons supérieurs.

c) **Sols fossiles momifiés** : Paléo-sols qui sont restés en surface, mais sous un climat tel qu'aucune nouvelle évolution n'a pu se réaliser. Ce cas sera essentiellement celui de sols à croûtes ou carapaces (calcaires ou latéritiques) conservés dans des régions devenues rapidement très sèches (déserts et leurs bordures).

II. — LES SOLS HÉRITÉS

Les sols actuels, jeunes ou mûrs, n'ont été mentionnés que pour présenter un tableau complet. Il n'y a pas lieu d'insister ici sur eux, sauf pour faire remarquer qu'ils sont certainement plus rares qu'on ne l'imagine.

a) **Sols hérités monophasés**. — Les premiers que j'aie eu l'occasion d'étudier se situent au *Cameroun occidental* (4). Dans cette région, il est assez facile de reconnaître que les sols latéritiques profonds (plusieurs dizaines de mètres) se sont surtout formés sur le socle granito-gneissique ancien avant la transgression marine du Crétacé supérieur qui les recouvre partiellement. Ils ont cependant continué à se développer sur les laves approximativement datées de la première moitié du Tertiaire (Paléogène) où ils atteignent 5 à 20 m d'épaisseur. Par la suite, l'altération a été plus faible et ne correspond pas à un type pédologique aussi défini. Il y a eu plutôt conservation des latérites anciennes que genèse de sols latéritiques nouveaux. En conséquence, les facteurs climatiques actuels

n'ont pas modifié les conditions de l' « héritage ». On peut parler de sols monophasés, bien que les sols profonds des hauts-plateaux soient manifestement de genèse ancienne pour leur majeure partie.

J'ai reconnu en 1958 des caractères tout à fait comparables pour beaucoup de sols des *Antilles françaises* (5). Une bonne partie de l'est et du sud-est de la Martinique, le tiers nord-est de Basse-Terre et la plaine des Abymes dans l'Ouest de Grande-Terre à la Guadeloupe corresdent au manteau d'altération d'un substratum antérieur aux calcaires oligocènes de la Martinique, miocènes de la Guadeloupe. Il s'agit d'argiles rouges faiblement latéritiques (horizon d'accumulation limité à des pisolites de fer et manganèse appelés pittoresquement « caca cabrit » par les créoles) accompagnées cependant de phénomènes de silicification qui soulignent bien l'influence d'un climat tropical humide datant au moins du Paléogène. Sur des laves néogènes (dacites du Carbet à la Martinique, par exemple), l'altération paraît être d'un type analogue mais les épaisseurs de sols sont bien moindres. Sur les formations géologiques plus récentes, on ne voit rien de semblable, mais les sols anciens ne paraissent cependant pas subir de modifications actuelles. Ici encore, de vastes surfaces sont donc couvertes par des sols de genèse ancienne, mais monophasés, ce qui fait que l'étude géologique seule nous prouve la part essentielle de l'héritage.

La plupart des sols rouges d'*Afrique du Nord* et du *Moyen-Orient* (Syrie, Liban, Palestine) paraît devoir être rangée dans une semblable catégorie. Sans doute a-t-on pu préciser l'existence de plusieurs phases de rubéfaction (notamment au Maroc et en Algérie), mais le climat actuel semble entraîner une évolution comparable quoique atténuée. Ainsi, les grands vignobles du Sahel d'Alger sont implantés sur des sols rouges villafranchiens épais, qui continuent peut-être à se développer dans le même sens. Je crois qu'il en est de même pour les principales étendues de sols rouges continus des régions de Tripoli et de la Bekaa au Liban (6). Tous ces sols seraient en somme à la fois vieux et jeunes sans que l'on puisse faire de distinction entre les divers épisodes d'évolution.

b) **Sols hérités polyphasés.** — Si nous poursuivons l'examen des sols rouges, mais cette fois-ci dans le *Midi de la France*, nous constatons, dans la très grande majorité des cas étudiés, qu'il s'agit de formations anciennes pouvant être datées de diverses époques (surtout du Tertiaire et du Quaternaire) mais qui ne correspondent plus à la tendance évolutive actuelle (7). Le climat méditerranéen atténué que nous observons en France ne paraît pas être maintenant capable d'entraîner de rubéfaction nette. J'ai déjà dit qu'il était plutôt capable de conservation que de modifications; cependant il y a, par places tout au moins, genèse de sols bruns sous la couverture végétale de garrigue ou de maquis, le sol

rouge franc ne se voyant alors qu'en profondeur. Plusieurs auteurs en ont conclu que le sol ancien devait être considéré comme une roche-mère pour le sol actuel, ou, d'une façon plus pittoresque, que les terres rouges sont devenues des « roches-filles « (non des sols), qui peuvent « devenir mères « à leur tour en permettant la genèse de n'importe quel nouveau type de sol. A vrai dire, je crois aujourd'hui que l'on aurait tort de ne pas considérer les terres rouges comme des sols car les végétaux continuent à les exploiter parfaitement. Seulement, l'évolution de la partie supérieure du profil se montre différente. On a, en somme, une fraction héritée, qui est rouge, et une fraction de néogénèse, le plus souvent brune. Le sol reste une unité, mais il a subi au moins deux actions climatiques distinctes : il est polyphasé (fig. 1).

Dans cette catégorie des sols hérités polyphasés, on pourrait citer d'innombrables exemples. Il est même permis de se demander jusqu'à quel point la majorité des sols présumés actuels n'en ferait pas partie, lorsqu'il s'agit de sols assez profonds. L'un des cas les plus facilement observables dans presque toute la France est celui des sols qui montrent en profondeur des plications d'origine périglaciaire, datant par conséquent au moins du würmien (sauf en montagne où des plications peuvent être actuelles), tandis que leurs horizons superficiels résultent d'une évolution postglaciaire qui se poursuit aujourd'hui (fig. 2).

III. — LES SOLS FOSSILES

Strictement, un fossile est un être que l'on ne peut étudier qu'après l'avoir extrait de la terre. Les sols hérités que nous avons envisagés précédemment ne doivent donc pas être qualifiés de fossiles et il serait souhaitable que l'on n'emploie pas ce terme comme un synonyme de celui, plus général, de paléo-sol. Par contre, les sols « enterrés » et les sols « exhumés » que nous allons mentionner maintenant sont véritablement des paléo-sols fossiles. Seuls, les sols « momifiés » ne peuvent être appelés fossiles que par extension, mais cette extention est proposée à l'exemple des paléontologistes qui n'hésitent pas à parler de poissons fossiles pour des restes gisant en surface dans les lagunes desséchées du Sahara par exemple.

a) **Sols fossiles enterrés.** — Le cas le plus classique et le plus fréquemment cité est celui des paléo-sols inclus dans la formation des *læss d'Alsace* (fig. 3). Ils ne sont visibles que grâce à l'exploitation de ces lœss comme terre à brique. Nous nous bornerons ici à renvoyer aux excellentes descriptions qui en ont été faites, notamment par J. FRANC de FERRIÈRE dans sa thèse (8). Remarquons, par ailleurs, que s'il m'a été possible de dater le début de la formation des sols hérités du Cameroun,

des Antilles, etc, c'est précisément en voyant leur passage à des sols enterrés, conservés notamment au-dessous de coulées de laves ou de sédiments marins transgressifs qui les ont fossilisés en partie. Seuls, des flancs de vallées ou des falaises en bordure de la mer permettent de reconnaître ces superpositions.

J'ai observé en 1952 un autre exemple spectaculaire découvert par l'abbé P. BORDET au *Hoggar* (9). Il s'agit d'argiles latéritiques recouvertes par des coulées basaltiques probablement quaternaires. On ne peut les étudier qu'à la faveur des entailles d'érosion de petits ravins très récents. Il va sans dire que ces sols sont tout à fait fossiles : ils se sont formés à une époque où le désert était soumis à un climat tropical humide et ne peuvent être actuellement utilisés par aucune végétation.

Dans certains cas particuliers, il peut exister des sols enterrés qui soient très récents. Par exemple, aux *Antilles*, les nuées ardentes de la Montagne Pelée de la Martinique et de la Soufrière de la Guadeloupe, maintes fois répétées, montrent dans les tranchées de routes qui les recoupent tout un empilement de sols humifères paraissant très jeunes (fig. 4). L'analyse de débris végétaux calcinés qui s'y trouvent (par la méthode du C. 14) en a datés dans les deux îles de 8 000 ans environ, mais il en est dont l'âge n'excède pas quelques décades (nuées de 1902 et 1929 à la Martinique).

Au *Liban*, j'ai vu des sols noirs néolithiques et des sols rouges ou châtains enterrés sous des coulées de boue ou des apports grossiers variés (fig. 5 et 6). Dans les *Basses-Alpes* françaises, on peut dire que les cônes de déjections torrentiels, à la stabilisation desquels travaillent nos forestiers, fossilisent encore actuellement bien des sols qui ont à peine eu le temps de se former sur des alluvions récentes. A cet égard, les exemples pourraient être innombrables.

b) **Sols fossiles exhumés.** — Si le jeu de la sédimentation a ainsi fossilisé bien des sols, par « enterrement », le jeu de l'érosion arrive inversement à décaper cette couverture et à « exhumer » les paléo-sols.

L'un des exemples les plus typiques que nous puissions observer en de nombreuses régions de France est celui des sols qui ont recouvert la pénéplaine posthercynienne antérieurement à la transgression triasique. Ainsi, à la bordure des *Cévennes* devant les *Grands Causses*, l'ancienne surface d'érosion se montre profondément altérée, rubéfiée ou encore recouverte d'argiles latéritiques que l'on voit plonger sous les dépôts du Trias et du Jurassique là où l'érosion les a respectées (fig 7). Il en est de même dans le Sud de l'*Auxois* sur les schistes et granites du *Morvan* septentrional. Dans ces deux cas très démonstratifs, nous pouvons étudier un paléo-sol datant de la fin du Primaire, enterré au début du Secondaire et exhumé généralement au Quaternaire.

Un exemple nettement moins ancien mais comparable est celui des

formations dites sidérolithiques (encore une argile latéritique à grenaille), datée de la fin du Crétacé et de l'Eocène, qui, à la surface des *Causses du Quercy*, a été souvent enterrée sous les sédiments lacustres de l'Oligocène et exhumée au Plio-Quaternaire. Il semble qu'une part tout au moins des argiles à silex qui recouvrent la *Champagne pouilleuse* soient également des paléo-sols de la fin du Crétacé, enterrés sous les premiers sédiments tertiaires du Bassin parisien et exhumés au Plio-Quaternaire.

Il sera souvent difficile de distinguer de tels sols fossiles exhumés des sols hérités, surtout si ceux-ci paraissent monophasés (fig. 8). Seule la reconstitution paléogéographique de l'avancée maxima de l'ancienne couverture le permettra. Cette distinction peut cependant ne pas être dénuée d'intérêt pratique. En effet le sol exhumé pourra renfermer parfois une fraction résiduelle provenant de la couverture fossilisante, donc certains éléments fertilisants (calcaire par exemple) ou des éléments améliorant ses qualités physiques (résidu sableux dans les argiles par exemple) qui feront au contraire totalement défaut dans le sol hérité voisin.

Une variété de sols fossiles exhumés qui fait en quelque sorte le passage à la catégorie des sols momifiés est celle qu'illustrent quelques sols à croûtes du *Bas-Languedoc*. P. MARCELIN (10) notamment a depuis longtemps attiré l'attention sur le « taparas » de la Costière de Nîmes. Il s'agit d'un horizon d'accumulation calcaire recouvrant des cailloutis rubéfiés villafranchiens et qui semble provenir du lessivage d'un lœss très fréquemment décapé par l'érosion, surtout dans les points hauts. On voit ainsi affleurer une sorte de carapace qui n'est pas de genèse actuelle et qui ne peut guère être utilisée par la végétation. Il n'y a pas eu ici véritablement « enterrement » puisque le taparas n'est qu'un horizon profond d'un sol quaternaire peut-être monophasé et que rien d'autre ne semble l'avoir recouvert. Cependant, cet horizon a été exhumé et n'a pas subi de nouvelle évolution, ce qui lui donne le caractère d'un sol fossile (fig. 9).

J'ai observé au *Mexique* une croûte calcaire assez comparable, dite « caliche », qui s'étend sur des surfaces notables et qui n'est recouverte actuellement que par un sol gris très mince et local. Au Nord même de Mexico, où elle surmonte des cendres et tufs andésitiques, elle est enterrée, par places, sous les dépôts à céramiques du lac de Texcoco, bien datés de 2 000 ans avant l'époque actuelle. On a donc ici la chance de pouvoir garantir qu'il s'agit bien d'une formation fossile, partiellement exhumée qui, cependant, pour les zones où elle n'a jamais été recouverte, se rapproche aussi beaucoup des sols momifiés (fig. 10).

c) **Sols fossiles momifiés.** — Dans bien des régions, aujourd'hui fort sèches et le plus souvent situées à la frontière des déserts, il est aisé d'observer de semblables sols à croûtes calcaires qui paraissent n'avoir jamais été recouverts par de quelconques sédiments mais qui sont restés en quel-

que sorte « figés » en surface lorsqu'une modification climatique, sans doute assez rapide, a pratiquement supprimé au-dessus d'eux toute action biologique.

Dans toute l'*Afrique du Nord* (Sud du Maroc, de l'Algérie, de la Tunisie) et le *Moyen-Orient*, ces croûtes momifiées sont très fréquentes. Elles ont été notamment décrites par V. AGAFONOFF (11). J. H. DURAND (12), épisodiquement par moi-même (13). Dans tous les cas, leur relative ancienneté est attestée par le fait qu'elles sont entaillées par les ravinements récents ou par les trous de plantation ayant parfois permis à une certaine végétation d'exploiter des horizons plus favorables situés sous la croûte elle-même.

Plus frappantes encore sont les carapaces latéritiques momifiées en plein *Sahara*. J'en ai vu de spectaculaires à l'ouest de Largeau, au pied du massif du Tibesti, dans l'extrême nord du territoire du Tchad Il semble qu'il y ait eu plusieurs périodes de genèse, la principale datant de la fin du « continental terminal » (passage du Tertiaire au Quaternaire). Elles forment actuellement des plates-formes desséchées qui dominent souvent des ravins subactuels aux flancs desquels on voit bien la « zone de départ » de l'ancien sol latérique au-dessous de la cuirasse ferrugineuse (fig. 11).

Bien que le climat actuel y permette une certaine végétation, on sait également grâce aux travaux de nombreux géographes et pédologues, que les « bowal » (ou « bowé ») de *Guinée* sont des plateaux à carapace latéritique momifiée parfois assez haut au-dessus des talwegs fonctionnels. On pouvait croire d'abord qu'il s'agissait de sols hérités monophasés, mais les études récentes ont prouvé qu'il n'y avait guère dans ces régions de genèse actuelle de sols latéritique : tout au plus, a-t-on des « latéritites » résultant du remaniement des débris de carapace dans les vallées.

Cet exemple nous prouve qu'il peut y avoir des sols fossiles momifiés même en dehors des déserts, mais ce sont alors toujours des types de sols renfermant des horizons d'accumulation très cohérents. En France, il semble qu'à côté du cas intermédiaire du « taparas », on puisse citer aussi des horizons d'alios possèdant un caractère analogue de « momification » sur de vieilles terrasses suspendues au-dessus des vallées actuelles ; cependant, il faut reconnaître que le plus souvent ces alios ont un peu évolué ou sont incorporés dans de nouveaux sols, ce qui les rapproche des sols hérités polyphasés.

Par contre, dans les déserts vrais, il peut y avoir des sols fossiles momifiés dénuées d'horizons d'accumulation. Je me bornerai à mentionner l'exemple de sols noirs que j'ai reconnus au *Hoggar*, sur de petites terrasses conservées au Nord immédiat de Tamanrasset. Ils datent, semble-t-il, d'une des dernières phases humides du Quaternaire très récent et sont restés sans changement depuis, pendant quelques millénaires (fig. 12).

CONCLUSIONS

Par les exemples précédents, je crois avoir bien montré qu'un très grand nombre de sols sont en réalité des paléo-sols, que l'on peut dater par les méthodes stratigraphiques. Cela est souvent vrai aussi bien pour ceux qui sont encore normalement exploités par la végétation (sols hérités) que pour ceux qui sont à peu près ou totalement étrangers à des utilisasations agricoles actuelles (sols fossiles).

Sans doute a-t-on décrit des cas bien étudiés de genèses et d'évolutions rapides pour des sols soumis aux influences des climats et de la végétation actuels, notamment pour des sols lessivés et podzols, peut-être pour certaines altérations en argiles tropicales. Cependant, je crois que pour la très grande majorité des sols profonds (plusieurs mètres) il y a lieu de retenir la probabilité d'une formation pendant une durée de temps fort longue, même longue au sens géologique du terme. En particulier, les sols latéritiques épais de plusieurs décamètres paraissent être toujours des paléo-sols pour leur plus grande partie, mais il est probable qu'il en est de même pour beaucoup d'autres types.

On a certainement eu tort de ne pas attacher assez d'importance à ce facteur de l'âge des sols en se bornant trop souvent à considérer seulement des facteurs génétiques actuels ou subactuels. Comme je l'ai dit plus haut, si la pédologie rend maintenant de grands services en permettant la compréhension de bien des phénomènes géologiques, inversement il semble que l'étude géologique est indispensable à la compréhension de maints phénomènes pédologiques. Seule, l'association des deux disciplines permet l'espoir d'éviter à l'avenir les grossières erreurs d'interprétation qui se sont glissées trop souvent dans une pédologie actualiste et trop dogmatique.

Reçu pour publication le 15 mai 1959.

RÉSUMÉ

Avec des exemples pris dans diverses régions du monde, l'auteur propose une classification des sols basée sur leur âge :

1° *Sols actuels ; a*) non évolués ; *b*) évolués. Ces sols n'ont subi, avec plus ou moins d'intensité, que l'influence de la phase climatique régnant actuellement dans le lieu où on les observe.

2° *Sols hérités ; a*) monophasés ; *b*) polyphasés. Sols encore utilisés par la végétation mais dont la genèse résulte essentiellement de facteurs clima-

tiques anciens. Les premiers ont conservé leur profil sans changement car le climat ne s'est guère modifié au cours des temps ; les seconds ont subi dans leurs horizons supérieurs l'influence des facteurs climatiques actuels, différents des anciens.

3° *Sols fossiles ; a*) enterrés ; *b*) exhumés ; *c*) momifiés. Sols qui ne sont généralement plus utilisés par la végétation et dont la genèse résulte uniquement des influences climatiques anciennes. Les premiers sont recouverts par de nouvelles formations géologiques ; les seconds ont été ramenés au jour par érosion de celles-ci mais depuis un temps si bref qu'aucune évolution actuelle n'a été possible ; les troisièmes sont restés figés en surface sous un climat tel qu'aucune évolution nouvelle n'a pu se réaliser.

SUMMARY

The concept of soil age and its application to some regional examples.

On examples taken from various parts of the world, it is proposed to classify soils according to their age :

1) Recent soils : *a*) evolved, *b*) non-evolved. These soils underwent to a greater or lesser degree the influence of the climatic phase actually prevailing in the region under observation.

2) Inherited soils : *a*) monophasic, *b*) polyphasic. Soils still under vegetation, but developed entirely under conditions of an ancient climate. The first maintained an unchanged profile, since the climate has not changed throughout the ages ; the second show in their upper profile the influence of present climate which differs from the ancient one.

3) Fossile soils : *a*) buried, *b*) exposed, *c*) mummified. Soils which generally carry no longer any vegetation and which developed entirely under the influence of ancient climates. The first are covered with new geological formations ; the second became exposed by recent erosion during which no further evolution took place ; the third remained on the surface under a climate which was not conducive to any further evolution.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Begriff von dem Alter der Böden, seine Anwendung bei einigen regionalen Beispielen.

Durch in verschiedenen Gegenden der Welt genommenen Beispiele, schlägt der Verfasser eine Klassifizierung der Böden vor die auf ihr Alter beruht :

1) Heutige Böden : *a*) nicht entwickelte ; *b*) entwickelte. Diese Böden wurden nur durch die zur Zeit am Ort wo man diese Böden beobachtet, herrschende klimatische Phase mehr oder weniger beeinflusst.

2) Geerbte Böden : *a*) einphasige ; *b*) mehrphasige. Durch die Pflanzen-

welt noch benutzte Böden, deren Bildung sich aber hauptsächlich aus ehemaligen klimatischen Faktoren ergibt. Die ersten haben ihr Profil ohne Veränderung behalten da das Klima sich kaum im Verlaufe der Zeit geändert hat, die zweiten haben in ihren oberen Horizonten den Einfluss der heutigen klimatischen Faktoren erlitten, die anders sind als die früheren.

3) Fossile Böden : *a*) eingegraben ; *b*) ausgegraben ; *c*) mumifizierte Böden die gewöhnlich nicht mehr von der Pflanzenwelt benutzt werden und deren Bildung sich ausschliesslich aus den früheren klimatischen Einflüssen ergibt. Die ersten sind durch neuere geologische Ablagerungen gedeckt, die zweiten wurden durch die Erosion dieser Ablagerungen wieder zu Tage gebracht, doch seit so kurzer Zeit, dass keine heutige Entwicklung stattfinden konnte ; die dritten sind unverändert an der Oberfläche geblieben und zwar unter einem Klima das keine neuere Entwicklung erlaubte.

Понятие о возрасте почвы; применение его к некоторым раионным образцам.

Б. ЖЕЗ. Агрогеологическая лаборатория Национального Агрономического Института в Париже.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Основываясь на образцах взятых в различных областях мира, автор предлагает классификацию почв основанную на их возрасте.

1. Почвы современные : *а*) не подвергнувшиеся эволюции; *б*) подвергнувшиеся ей. Эти почвы подверглись, более или менее интенсивно, только влиянию климата, установившегося теперь в месте их нахождения.

2. Почвы унаследованные : *а*) однофазные; *б*) многофазные. Почвы еще служащие растениям, но образование которых определено главным образом существовавшими некогда в прошлом климатическими факторами. Почвы однофазные сохранили свой профиль неизменившимся, так как климат почти что не изменился в ходе времени; многофазные подверглись, в их верхних горизонтах, влиянию современных климатических факторов, отличных от преждесуществовавших.

3. Почвы ископаемые : *а*) погребенные; *б*) отрытые; *в*) мумифицированные. Почвы, которые обычно больше не служат растениям и образование которых обусловлено одними только прежними климатическими воздействиями. Почвы погребенные покрыты новыми геологическими образованиями; почвы отрытые вынесены на поверхность эрозией, но настолько недавно, что какая-нибудь современная эволюция невозможна; мумифицированные остаются на поверхности, остановленные в своем развитии таким климатом, что никакая новая эволюция не могла произойти.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) GÈZE (B.). — Paléo-sols et sols dus à l'évolution actuelle, *Conf. Pédologie méditerranéenne*, p. 140-156 et *Ann. Ec. nat. Agri. Montpellier*, t. 27, fasc. 4, 1947.
(2) *VIe Congr. intern. Sc. du Sol*, Paris, Vol. A, p. 178, 1956.
(3) GÈZE (B.). — Méthode d'étude de la zonalité pédogénétique par la paléopédologie, *C. R. Acad. Sciences*, t. 228, p. 333, 1949.
(3) ERHART (H.). — La genèse des sols en tant que phénomène géologique, Paris, Masson, 1956.
(4) GÈZE (B.). — Observations sur les sols du Cameroun occidental, *Ann. Agro.*, t. 12, p. 103, 1942.
(5) GÈZE (B.). — Excursion géologique à la Martinique et à la Guadeloupe, *C. R. somm. Soc. Géol. Fr.*, séance du 2 mars, 1959.
(6) GÈZE (B.). — Observations sur les sols du Liban, *Notes et Mémoires sur le Moyen-Orient*, t. V, p. 237, 1954, et Carte de reconnaissance des sols du Liban, Beyrouth, 1956.
(7) GÈZE (B.). — *op. cit.*, 1947.
(8) FRANC DE FERRIÈRE (J.). — Géologie et Pédologie. Contribution à l'étude des formations quaternaires de la plaine d'Alsace, Strasbourg, Imp. Alsacienne, 1937.
(9) BORDET (P.). — Présence de latérites fossiles dans l'Atakor du Hoggar, *C. R. somm. Soc. Géol. Fr.*, séance du 12 mars 1951.
(10) MARCELIN (P.). — Terres et sols en Costière, Nîmes, Chastanier et Alméras, 1947.
(11) AGAFONOFF (V.). — Sols types de Tunisie, *Ann. Serv. Bota. et Agro. Tunisie*, t. 12-13, 1936.
(12) DURAND (J. H.). — Étude géologique, hydrogéologique et pédologique des croûtes en Algérie, *Serv. Et. Scient. Colonis. et Hydraulique*, Pédologie, n° 1, 1952.
(13) GÈZE (B.). — *Op. cit.*, 1954 et 1956.

Planche I

SOLS HÉRITÉS POLYPHASÉS

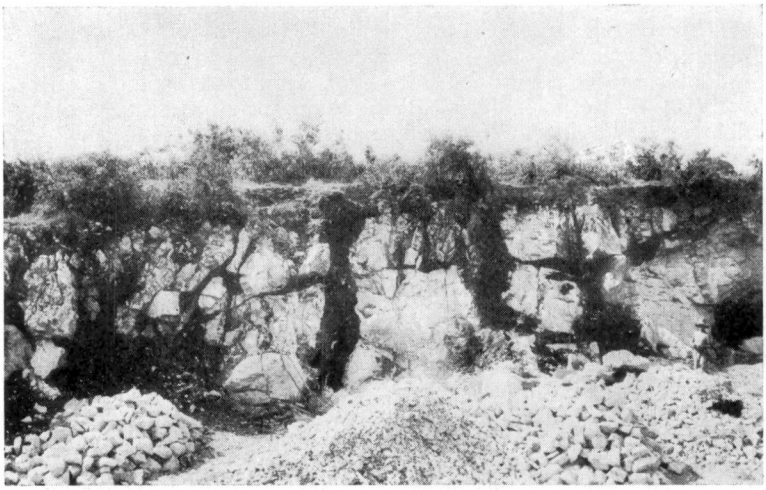


Fig. 1. — Paléo-sol rouge, remplissant les fentes d'un calcaire jurassique et qui a récemment évolué vers un sol brun dans sa partie supérieure. Garrigue de Castelnau-le-Lez près de Montpellier (Hérault).

Fig. 2. — Sol dont la partie profonde montre des phénomènes de solifluction datant probablement d'un épisode périglaciaire würmien, tandis que l'horizon supérieur évolue actuellement vers un sol brun lessivé. Montsauche (Nièvre).

Planche II

SOLS FOSSILES ENTERRÉS

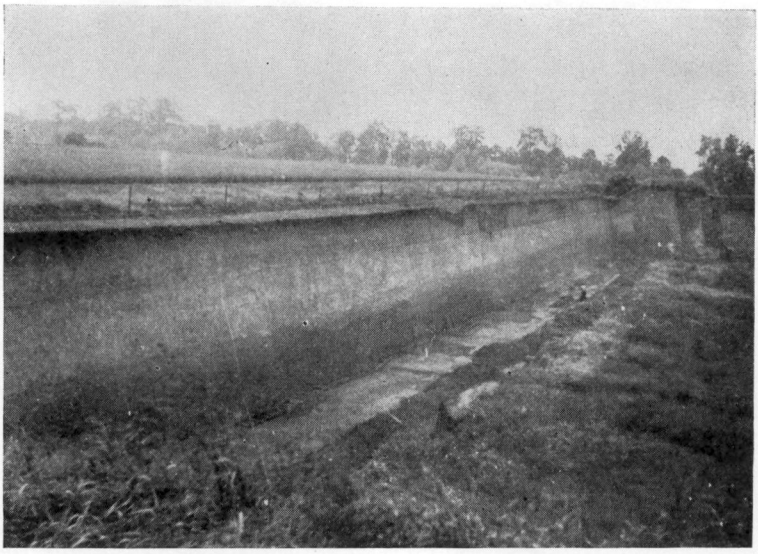


Fig. 3. — Succession de sols enterrés visible dans une carrière de lœss près d'Achenheim (Bas-Rhin).

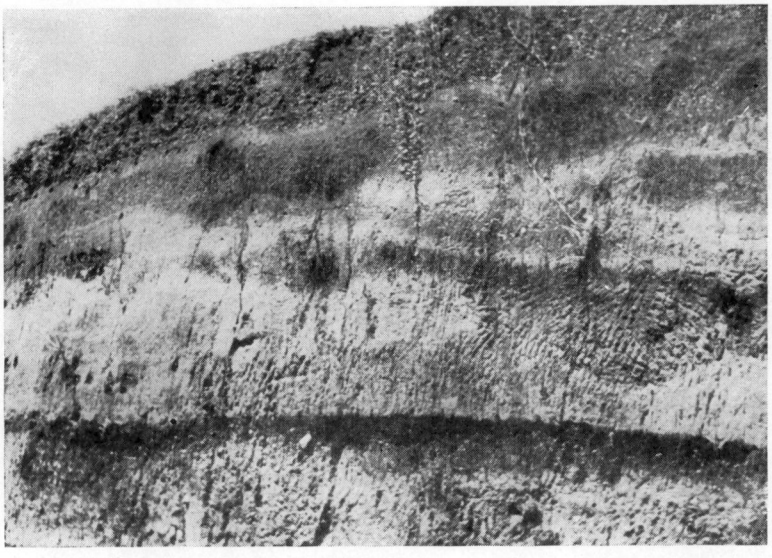


Fig. 4. — Succession de sols enterrés sous des dépôts de nuées ardentes provenant de la Montagne Pelée. Route d'Ajoupa Bouillon à Morne Rouge (Martinique).

Planche III

SOLS FOSSILES ENTERRÉS

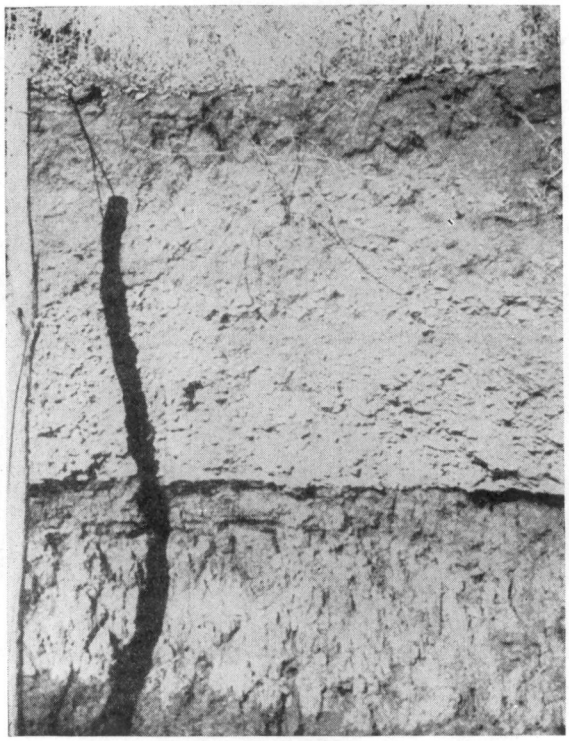


Fig. 5. — Succession de sols enterrés à Tanaïel, Bekaa centrale (Liban). De haut en bas : lit de cailloutis d'apport actuel ; sol châtain clair subactuel, formé sur des cailloutis puissants de 60 cm ; sol noir néolithique.

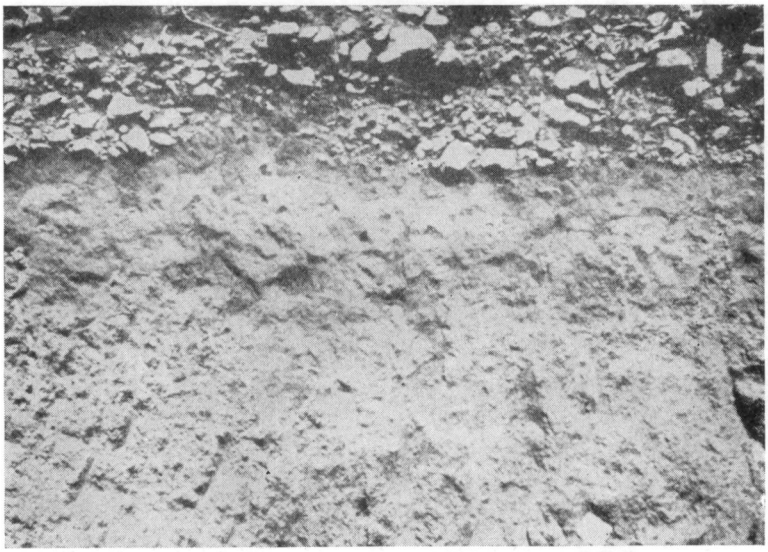


Fig. 6. — Sol enterré près de Khaldé, Sud de Beyrouth (Liban). Sol rouge sableux ancien sur grès dunaire calcaire, recouvert par des cailloutis grossiers d'apport torrentiel récent.

Planche IV

SOLS FOSSILES EXHUMÉS

Fig. 7. — Vieille pénéplaine sur schistes près de Barre-des-Cévennes (Lozère). Sa surface est couverte par des argiles rouges, résidus d'un sol à tendance latéritique antérieur aux dépôts triasiques et liasiques conservés ici seulement dans la butte-témoin visible à gauche de la photographie.

Fig. 8. — Argiles latéritiques de la « Savane des pétrifications » (Martinique). Il s'agit, le plus souvent, d'un sol hérité monophasé, mais ici il fut recouvert par des sédiments calcaires oligocènes dont un témoin demeure visible au dernier plan. On a donc affaire, en ce point, à un sol éocène récemment exhumé.

Planche V

SOLS FOSSILES EXHUMÉS

Fig. 9. — Sol à croûte calcaire, dit « taparas » dans la Costière de Nîmes, près de Bellegarde (Gard). Cet horizon est actuellement visible en de nombreux points à la suite du décapage par l'érosion du manteau de lœss qui le fossilisait et dont on voit ici un maigre résidu utilisé par la végétation.

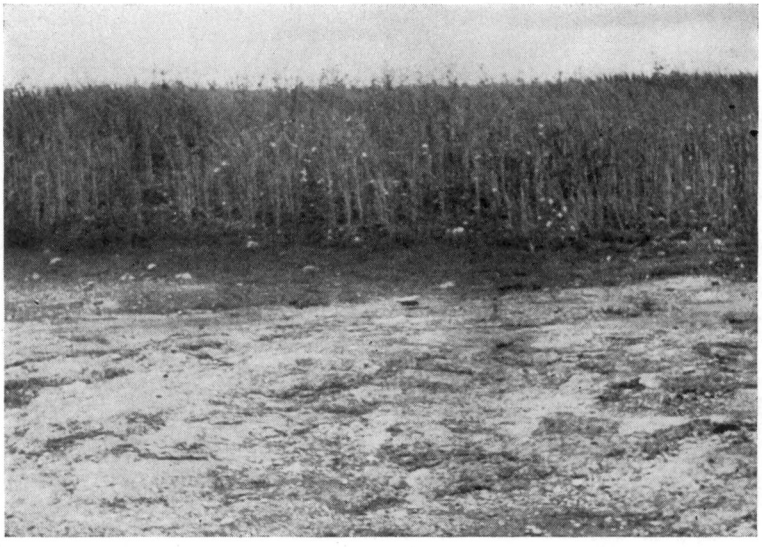


Fig. 10. — Sol à croûte calcaire, dit « caliche » près de Mexico (Mexique). L'érosion a presque entièrement décapé le sol gris qui recouvrait le sol fossile dont l'âge a pu être ici précisé (environ — 2 000 ans).

Planche VI

SOLS FOSSILES MOMIFIÉS

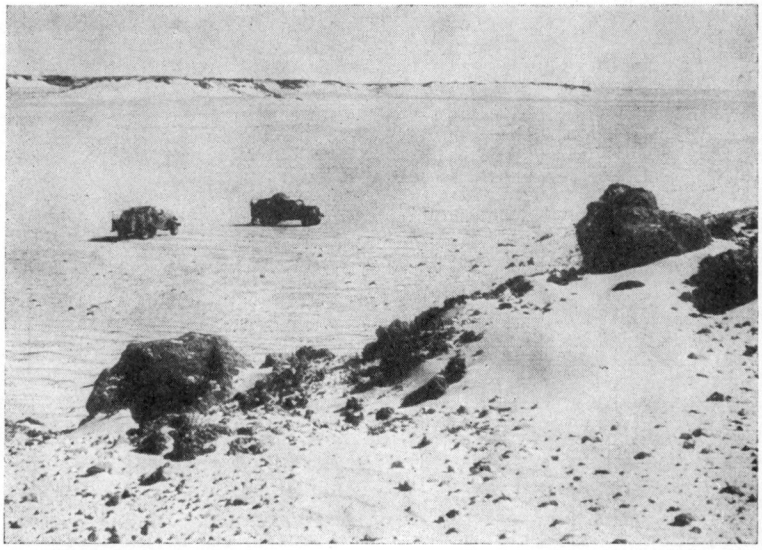


Fig. 11. — Sol à carapace latéritique, datant de la fin du Tertiaire ou du début du Quaternaire, momifié et formant la surface de petits plateaux près de Largeau, au pied du Tibesti (Sahara du Tchad). Sol actuel désertique, non évolué, dans les dépressions.

Fig. 12. — Succession de sols noirs momifiés, visibles dans les versants de l'oued Tamanrasset (Hoggar). Ils datent probablement d'une des dernières phases humides du Quaternaire.

631. 483 : 551. 311. 22.

ÉTUDE DU PROBLÈME DES PREMIERS STADES DE L'ALTÉRATION DE QUELQUES ROCHES

PAR

P. BIROT
Institut de géographie, Faculté des Sciences, Paris

S. CAILLÈRE
Laboratoire de minéralogie Muséum d'Histoire naturelle, Paris

S. HÉNIN
Institut National Agronomique, Paris

L'altération des roches éruptives dans le milieu naturel présente des aspects très variés. Il semble que les circonstances locales modifient profondément le faciès et les mécanismes de l'altération de la roche fraîche. Nous avons essayé d'effectuer une étude expérimentale de ces phénomènes avec le double but d'en préciser les processus et de rechercher des tests qui appliqués au laboratoire permettraient de confirmer ou d'expliquer les observations effectuées dans le milieu naturel. En d'autres termes nous avons essayé de constituer des modèles expérimentaux pouvant servir de comparaison (P. BIROT 1947 ; S. CAILLÈRE, P. BIROT, HÉNIN, 1952, 1954, 1955, 1957).

Nous nous sommes orientés tout d'abord vers des techniques consistant à soumettre une roche fraîche à des actions variées : humidité, sécheresse, solutions alcalines ou acides.

En effet, l'un de nous avait déjà montré que les alternances d'humectation et de dessication provoquaient une désagrégation poussée des roches avec formation de sable. Dans une certaine mesure on peut dire que les conditions de ces expériences imitent l'action des facteurs caractérisant un climat tropical à saison sèche et humide, alternées.

La température de 70° à laquelle la dessication de la roche était réalisée est de l'ordre de grandeur de celle que l'on peut observer sous forte insolation dans la nature et la température de 20° reproduit également celle des pluies de ces régions.

Parmi les facteurs qui semblent responsables de l'altération des roches, il en est un qui a été mis nettement en évidence, c'est la cristallisation des sels formés par l'hydrolyse des minéraux. On peut accélérer cet

effet en utilisant, au lieu de l'eau distillée, des solutions de carbonate de sodium, ou mieux, de sulfate de sodium.

On obtient alors une désagrégation beaucoup plus poussée, le pourcentage d'éléments fins atteignant, avec le sulfate de Na 6 p. 100 en six mois. L'hyposulfite a permis d'obtenir une désagrégation de 100 p. 100 dans le même temps avec un granite mais sans phase argileuse.

L'examen microscopique de la roche traitée, (il s'agissait d'un gabbro du Palatinat à augite pigeonitique et olivine) montre une séricitisation des feldspaths et la disparition de l'augite, mais le fait le plus remarquable est l'existence dans le matériel d'altération d'une argile de type saponite bien caractérisée par son diagramme de R. X. et ses propriétés de gonflement. Seul ce gabbro a permis d'obtenir un résultat aussi net, les autres roches mises en expérience, pegmatite, granulite et foyaïte, des minéraux comme l'hypersthène, le labrador et l'anorthite se sont parfois arénisés, mais sans fournir d'argile.

On pouvait conclure de cette première série d'expériences que l'argile provenait de l'altération de l'augite. En fait. A. LACROIX (1893-1895) avait déjà signalé la présence, dans divers gabbros, de petites plages de bowlingite. Au cours de nos expériences nous avons voulu vérifier la pureté du matériel initial. Dans un certain nombre de cas nous avons constaté qu'un broyage grossier de la roche, suivi d'un épuisement par une solution dispersante, solution de citrate d'ammonium à 1/1 000 permettait d'extraire, même de roches relativement fraîches, de petites quantités d'argile de type montmorillonitique au sens large (argiles gonflantes à équidistances de base 10 Å). Il est donc difficile d'affirmer que les minéraux argileux se sont formés au cours de l'expérience. Cette conclusion paraissait cependant très probable.

Ainsi avons-nous été conduits à employer un matériau sans aucun minéral argileux initial (gabbro de Timiourkane, Maroc) et d'autre part à varier la gamme des traitements : application de solutions basiques (CO^3NaH) à pH 7,5 et acide (acide acétique) pH 5. Ou encore alternance hebdomadaire de ces pH appliqués à un même échantillon pendant 15 semaines. Les résultats obtenus sont reproduits dans le tableau ci-dessous.

On constate que dans les trois cas considérés, gabbro du Maroc, gabbro du Palatinat et granite de Louvigny, on a vu apparaître une argile soit de type montmorillonitique au sens large, soit une chlorite gonflante (montmorillonite avec une couche d'hydroxyde de type brucite entre les feuillets).

Il est à remarquer qu'à côté des fragments plus ou moins désagrégés, il existait, adhérant à la surface externe une croûte d'altération de couleur rougeâtre. Ces différentes parties du matériau ont été broyées, puis passées au tamis 60 et fractionnées par sédimentation. On constate, qu'outre la présence d'argile, il se forme une certaine quantité de produits

colloïdaux. Ce fait est établi par l'accroissement des pertes de poids par chauffage entre 100 et 1 000° des roches traitées par rapport aux roches initiales.

Dans la planche I on trouvera groupées les courbes obtenues avec le gabbro du Palatinat avant et après traitement.

Dans le cas du gabbro du Maroc à l'état frais, celui-ci n'a libéré que des traces d'argiles et la perte d'eau entre 100 et 1 000° est très faible. Au contraire, le produit traité perd 4 p. 100 d'eau. Une constatation du

Nature de la roche	1 Quantité d'argile (%)	2 Nature de la fraction < 2 μ	3 Perte d'eau entre 100 et 1 000 (%)	3 Somme des éléments amorphes extraits %
Gabbro du Maroc				
Frais	Traces	Chlorite		
Traité à l'eau distillée	5,1	gonflante	4,0	2,1
Gabbro du Palatinat				
Frais	2,3	Montmorillonite	1,8	1,9
pH alterné	5,3	—	7,0	2,5
pH 5	6,4	—	6,4	1,9
Granite de Louvigny				
Frais	1,2	Mica ± Minéraux non argileux	0,4	1,1
pH 5	4,9	Montmorillonite + illite	3,3	0,5

même ordre a été faite avec le granite de Louvigny, il est donc à peu près certain qu'il s'est formé, au moins par diagenèse, des minéraux argileux au cours de ce traitement.

Il reste encore assez difficile de comprendre le mécanisme intime de cette évolution. Le microscope montre parfois une altération intense de certains minéraux et ceci suffit pour fournir les éléments constituant la phyllite. Cependant ce résultat apparaît à travers un processus très compliqué qui ressort de l'étude comparée de la roche, de la croûte d'altération et de la solution au contact. Nous trouvons la phyllite dans la roche, dans la croûte et dans les produits de désagrégation. Les solutions baignant les roches renferment de petites quantités de silice, mais très peu d'hydroxydes. Au contraire, la croûte en contient une certaine quantité. Ainsi les produits provenant de la dégradation des minéraux initiaux se dissocient au cours de ces traitements, les hydroxydes paraissant moins mobiles que la silice.

L'allure de ce processus dépend d'ailleurs des conditions de l'expérience. Si l'on renouvelle périodiquement les solutions en contact, l'altération des roches, des gabbros en particulier, se trouve freinée.

Il en est de même dans le cas tout à fait opposé où la roche baigne constamment dans la solution. Si celle-ci n'est pas renouvelée, son pH

s'élève et l'altération cesse. Si la solution est renouvelée on ne dissout encore que fort peu d'éléments, sauf si on opère en milieu relativement alcalin, pH = 8, on y trouve alors une certaine quantité de silice accompagnée d'un peu de chaux.

Ainsi, dans ces expériences, les facteurs qui se sont montrés les plus actifs ont été les alternances d'humectation et de dessiccation et la concentration des produits d'altération résultant du fait que les solutions n'étaient pas renouvelées.

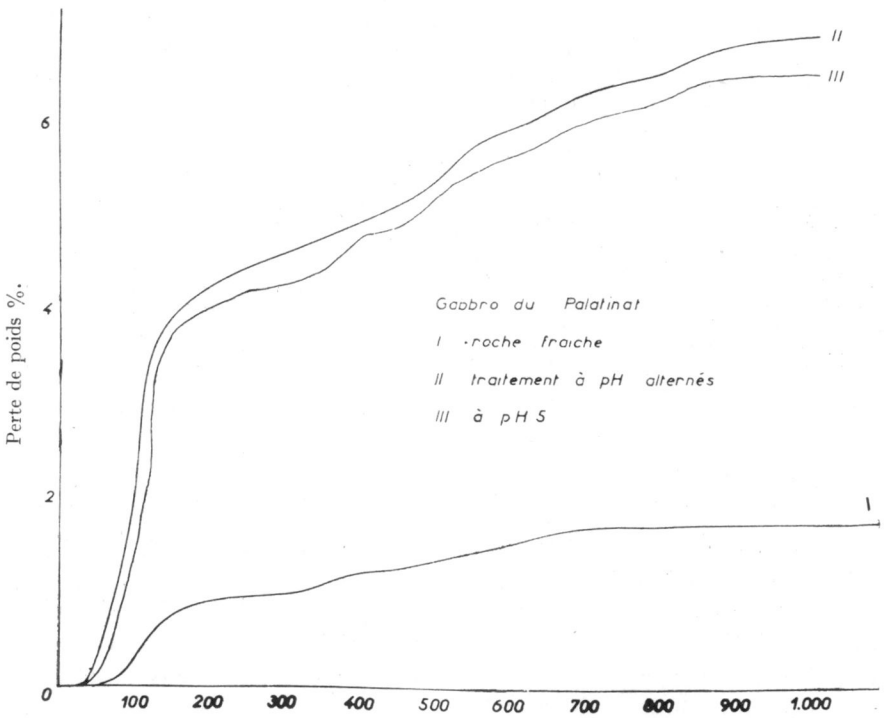


PLANCHE I

Ces résultats conduisent à supposer que les premières phases d'altération des roches éruptives dans la nature devaient s'accompagner de la formation de montmorillonite. La tendance des roches basiques à donner des minéraux de cette nature au cours de leur évolution a été fréquemment signalée.

En particulier J. de LAPPARENT (1936) et W. TOMLINSON et A. MEIER (1937) ont montré que l'altération des roches basiques éruptives ou volcaniques donnaient de la montmorillonite. Encore récemment nous avons pu vérifier ce fait sur le basalte de Laguiole (Aveyron). Ainsi le point important pour nous consistait à montrer la présence de montmorillonite au cours des premières phases d'une dégradation aboutissant à la forma-

tion de minéraux différents. L'étude de la latéritisation nous a paru constituer un cas particulièrement démonstratif.

Nous avons opéré tout d'abord sur une série de roches basiques, dolérite, amphibolite et gabbro prélevés en Guyane, au Brésil et à Madagascar.

Ces échantillons constituaient un matériel particulièrement favorable, puisque l'on sait, en particulier depuis les travaux de A. LACROIX, que l'on passe de la roche altérée à la roche fraîche sur des distances de l'ordre du centimètre et parfois moins.

La technique expérimentale a consisté à faire sauter la zone franchement altérée à l'aspect « pain d'épices » à l'aide d'un burin, puis à attaquer les couches sous-jacentes avec le même outil jusqu'à atteindre la zone fraîche. Le matériel ainsi recueilli était trituré dans une solution de citrate de soude et la fraction fine dispersée recueillie par décantation.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Nature des roches	Minéraux de néoformation dans les différentes phases			
	Fraîche	1re phase	2e phase	Croûte extérieure
Dolérite..... Cayenne (Guyane française)	néant	Montmorillonite probable	Montmorillonite	Hydroxydes Fe et Al + très peu de kaolinite
Amphibolite..... Carrière 4 km Guyane française		Hydroxydes Fe et Al		Hydroxydes Fe et Al + très peu de kaolinite
Gabbro ..... Vista Chinese (Brésil)	néant		Montmorillonite + peu de kaolinite	Hydroxydes Fe et Al + très peu de kaolinite
Gabbro ..... Tongafeno (Madagascar)	néant	Montmorillonite probable		Hydroxydes Fe et Al + kaolinite

On constate que dans deux cas la montmorillonite est sûrement identifiée que dans un cas, elle peut être considérée comme probable et que dans l'amphibolite de Cayenne, elle n'a pas été mise en évidence.

Etant donné l'extrême difficulté que présente l'opération, le peu de matériel dont nous disposions, cette absence n'est pas nécessairement significative.

Nous avons déterminé le pH de la roche broyée dans une solution KCl /0,05 N. Les résultats obtenus sont groupés dans le tableau ci-dessous :

	Dolérite	Gabbro Brésil	Gabbro Madagascar
	—	—	—
Roche fraîche.....	5,4	5,8	6,1
Zone de transition.....	5,2	5	5
Zone externe.....	5,1	4,5	4,9

Ils montrent que dans la zone de transition où se trouve la montmorillonite, les roches sont franchement acides, mais nous avons vu que dans les expériences de laboratoire on trouvait également des montmorillonites quand les solutions d' attaque avait un pH inférieur à 7.

Nous avons alors essayé d'étendre ces observations à des roches acides : granite, syénite, gneiss et leptinite prélevées soit au Brésil, soit aux îles de Los. Les résultats ont été beaucoup moins nets que dans le cas précédent. A vrai dire la recherche de la montmorillonite était également plus délicate du fait que la zone d'altération qui sépare la roche fraîche de la partie franchement latéritique s'étend sur une épaisseur qui atteint souvent plusieurs mètres.

Sous les horizons kaoliniques nous avons pu toutefois identifier sûrement un mélange de montmorillonite et de chlorite gonflante dans la leptinite de Laranjeiras (Brésil) et la présence possible de montmorillonite sur le gneiss œillé de Morro de Babilonia (Brésil). Sur un autre versant du même Morro, M. TAVORA a pu identifier la montmorillonite à la demande de l'un de nous.

Par contre nos tentatives ont échoué pour la syénite néphélinique de Fatoya (Iles de Los).

Enfin nous avons appliqué la même technique à l'étude de versants rocheux en pente raide, complètement nus. Aucune trace d'argile n'a été relevée dans l'écaille d'un inselberg granitique de la région de Tamanrasset, en milieu désertique. Le même résultat négatif a été obtenu sur une paroi gneissique de pain de sucre (dont l'écaillage n'avait pas encore commencé) évoluant en climat tropical humide (route de Rio de Janeiro à Petropolis). Ainsi il semblerait que, au moins en climat aride, la production des écailles n'implique pas la formation de phyllites.

Par contre, un échantillon de gneiss, prélevé à quelques mètres au-dessus d'une guelta dans la région de Tamanrasset, accuse la formation de minéraux de type montmorillonitique, bien que la roche soit parfaitement nue et coupée par un versant subvertical. L'horizon profond renferme encore une chlorite gonflante, associée à une illite fortement interstratifiée qui paraît provenir de l'altération du mica de la roche initiale. L'évolution du gneiss est bien mise en évidence dans la planche II qui comporte les courbes thermopondérales de la roche fraîche prélevée à 30 cm (courbe *a*) de la couche voisine 10 à 20 cm (courbes *b*, *c*) et la couche superficielle légèrement altérée, quoique tout aussi compacte (courbe *d*). Cette différence avec les autres versants nus est probablement due à la condensation de la vapeur d'eau qui se dégage de la guelta.

Cet ensemble de résultats expérimentaux et d'observations effectuées sur des matériaux dont beaucoup ont été recueillis par nous-mêmes, nous amène aux conclusions suivantes :

Au cours des premières phases d'altération sous l'influence en particulier de solutions d'électrolytes, les roches éruptives cristallophylliennes et les laves subissent une attaque qui provoque plus ou moins leur désagrégation et s'accompagne de la formation de minéraux argileux de type montmorillonite-saponite dans la majorité des cas.

C'est seulement pour les roches acides que cette évolution semble nécessiter des conditions complémentaires.

Les minéraux isolés soumis au même traitement ne sont que fort peu altérés ou en tout cas n'ont pas donné naissance à des argiles. Il est possible que la formation des phyllites soit facilitée par l'existence d'une porosité interne déterminant une certaine vitesse de circulation au contact de minéraux différents.

Ces faits montrent bien l'extrême difficulté que représente l'inter-

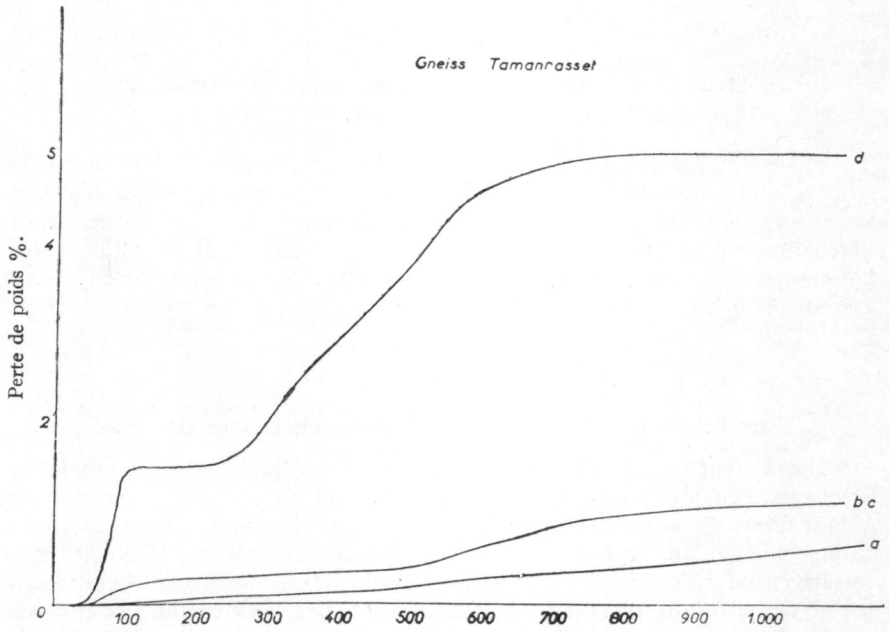


PLANCHE II

prétation des phénomènes d'altération dans le milieu naturel puisque même lorsque celle-ci, comme c'est le cas dans les roches basiques, apparaît d'une manière presque explosive en donnant naissance à des produits très caractéristiques, kaolinite, hydroxydes, elle se trouve préparée par un premier stade conduisant à la formation évidemment transitoire de minéraux d'une nature bien différente.

Enfin d'un point de vue pratique, il est nécessaire que les observations comportent une étude aussi fine que possible de la roche initiale dès les premiers stades de l'altération.

En résumé, il nous semble que la méthode expérimentale nous ait permis ainsi de saisir cette toute première phase de l'évolution des roches.

RÉSUMÉ

L'altération des roches dans le milieu naturel présente des aspects très variés, c'est pour préciser le processus de ces phénomènes et pour chercher des tests de laboratoire qui permettraient de confirmer ou d'expliquer les observations faites dans le milieu naturel, que les auteurs ont entrepris cette étude expérimentale. Sur diverses roches, diverses actions, alternance d'humectation et dessiccation, influence de solutions basiques et acides ou alternance de ces solutions, etc... ont permis de saisir les premières phases de l'évolution des roches.

SUMMARY

Study of the problem of the first stages of alteration in certain rocks.

Since the alteration of rocks in natural environment has very varied aspects, a study was made of this process and of laboratory tests which may confirm or explain observations made under natural conditions. Various rocks were subjected to alternate wetting and drying, and to alkaline and acid solutions applied singly or alternately. The results yielded information on the first stages of the evolution of rocks.

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Frage der ersten Verwitterungsstadien einiger Gesteine.

Die Verwitterung der Gesteine in der Natur zeigt sehr mannigfaltige Erscheinungen. Die Autoren haben Modellversuche unternommen um den Ablauf dieser Prozesse näher zu kennzeichen und um einfache Laboratoriumsuntersuchungen aus zu finden, die die in der Natur gemachten Beobachtungen, bestätigen oder erklären könnten. Auf verschiedenen Gesteinen, konnten die ersten Verwitterungsphasen festgestellt werden bei Einwirkung von abwechselnden Anfeuchtungen und Trocknen, von basischen oder sauren Lösungen oder von abwechselnd basicher und saurer Lösungen, u. s. w...

Изучение начальных фаз разложения некоторых горных пород.

П. БИРОТ, С. КАЙЕР и С. ВЕНЭН.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Изменение горных пород в естественной среде бывает очень разнообразно; чтобы установать ход этих явлений и чтобы найти лабораторные данные позволяющие подтвердить или объяснить наблюдения, сделанные в естественной среде, авторы предприняли это экспериментальное изучение, производившееся на различных горных породах различными воздействиями : переменой смачивания и высушивания, воздействием щелочных и кислых растворов или переменным их действием, и т. д. и позволившее установить первые фазы эволюции горных пород.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) Birot (P.). — Résultat de quelques expériences sur la désagrégation des roches cristallines. *C. R. Acad. Sci.*, **225,** p. 745-7, 1947.
(2) Caillère (S.), Birot (P.), Henin (S.). — Formation d'un minéral argileux par altération expérimentale d'un gabbro. *C. R. Acad. Sci.*, **234,** p. 2 104, 1952.
(3) Caillère (S.), Birot (P.), Henin (S.). — Étude expérimentale du mécanisme de la désagrégation de quelques roches éruptives et métamorphiques. *C. R. Congr. Inter. Sci. du Sol*, Léopoldville, vol. II, p. 18-22, 1954.
(4) Caillère (S.), Birot (P.), Henin (S.). — Essai d'altération artificielle de quelques roches. *C. R. Acad. Sci.*, **240,** p. 1 441-42, 1955.
(5) Caillère (S.), Birot (P.), Henin (S.). — Sur la formation transitoire de montmorillonite dans certaines altérations latéritiques. *C. R. Acad. Sci.*, **244,** p. 788-91, 1957.
(6) Lacroix (A.). — Minéralogie de la France et de ses colonies, Paris, T. I, p. 446, 1893-95.
(7) Lapparent de (J.). — Les milieux générateurs de la montmorillonite et de la sépiolite. *C. R. Acad. Sci.*, **203,** p. 553-555. 1936.
(8) Thomlinson (W. H.), Meier (A. E.). — On the origin of montmorillonite. *Amer. Min.*, **22,** p. 1 124-1 130, 1937.

631. 414. 2 : 631. 414. 3 : 631. 811.

ÉNERGIE D'ADSORPTION DES IONS MINÉRAUX PAR LES COLLOIDES DU SOL ET NUTRITION MINÉRALE DES PLANTES (1)

TROISIÈME PARTIE

NUTRITION MINÉRALE DES PLANTES, ACTIVITÉS IONIQUES ET ÉNERGIES D'ADSORPTION

PAR

R. BLANCHET

Station centrale d'Agronomie, Versailles.

PLAN DU MÉMOIRE

Nutrition minérale des plantes en solutions pures.
(Rappel des principales données.)
Nutrition minérale des plantes dans le sol.
Nutrition phosphatée. — Nutrition des plantes dans des solutions coulantes et dans des sols diversement enrichis.
Examen de divers types de sols.
Conclusions.
Nutrition potassique. — Nutrition des plantes dans des solutions coulantes et dans des sols diversement enrichis.
Nutrition potassique dans divers sols cultivés.
Conclusions.
Modification apportées par une culture à l'état des réserves du sol.
Energétique et cinétique de l'absortion.
Conclusions générales.

Dans l'examen des réserves phosphoriques et potassiques de divers types de sols, trois données essentielles ont été mises en évidence (mémoires antérieurs) :

— la concentration de la solution du sol en l'élément considéré,

(1) Voir, pour les deux premières parties de ce travail :
— Énergie d'adsorption de divers ions par des argiles pures, *Ann. Agr.* n° 1, p. 5.
— Application des énergies d'adsorption à l'étude des sols, *Ann. Agr.* n° 2, p. 125.

— La quantité d'éléments adsorbée,

— L'énergie nécessaire à la libération des ions adsorbés.

La concentration de la solution d'un sol est fonction de la quantité d'élément adsorbée. Une telle relation n'existe cependant plus lorsque l'on considère des sols différents : la concentration de leurs solutions dépend de la masse d'ions adsorbés, mais aussi de la masse d'adsorbant, et de sa nature. Ainsi, une même quantité d'ions adsorbés par une kaolinite ou par une montmorillonite est en équilibre avec des concentrations extrêmement différentes, en raison de leurs capacités d'échange d'ions également très différentes. On observe de même des sols riches en éléments adsorbés, qui possèdent cependant des solutions très diluées. Ce fait est particulièrement net dans certains sols tropicaux, qui renferment beaucoup d'ions PO_4, adsorbés, et pourtant des solutions de concentrations très faibles.

Un problème important se pose donc : la plante s'alimente-t-elle essentiellement aux dépens de la solution du sol, ou, au contraire, les racines placées au contact étroit des particules de terre peuvent-elles puiser directement les éléments adsorbés? En d'autres termes, la plante s'alimente-t-elle dans la solution du sol comme dans une solution de concentration sensiblement constante, continuellement régénérée par la désorption des ions retenus sur les coloïdes, ou, en raison d'absorptions au contact des particules de terre, les ions adsorbés peuvent-ils concourir directement à la nutrition?

La réponse à ce problème entraîne d'importantes conséquences à l'égard de la fertilisation : si les plantes ne s'alimentent qu'à partir des ions en solution, il est indispensable d'enrichir le sol par des engrais jusqu'à ce que la solution du sol atteigne la concentration minima compatible, en solution constamment renouvelée, avec une croissance active des plantes. Sinon, cet enrichissement qui s'avère parfois considérable n'est pas nécessaire.

Il faut ainsi envisager l'influence sur la nutrition des plantes des deux caractéristiques énergétiques essentielles : l'activité ionique, aproximativement indiquée par la concentration de la solution du sol, et l'énergie d'adsorption.

NUTRITION MINÉRALE DES PLANTES EN SOLUTIONS PURES (rappel des principales données).

L'influence de la concentration des solutions sur la nutrition minérale des plantes a fait l'objet de nombreuses études de Physiologie Végétale et d'Agronomie (110-111). Toutefois, la reproduction la plus exacte possible des solutions du sol s'avère très difficile : ces solutions sont très diluées en certains ions, notamment les ions PO_4 ; elles renferment au

contraire des quantités d'ions Ca^{++} très supérieures aux besoins des plantes. D'autre part, leur concentration est sensiblement constante, en raison des équilibres d'adsorption. La culture de plantes dans des solutions de concentrations et de pH constants, durant de longues périodes, soulève de grandes difficultés expérimentales. Ces cultures ne peuvent guère être effectuées que dans des solutions coulantes, constamment renouvelées, de façon que le prélèvement des ions par les plantes n'entraîne pas de diminution notable de la concentration.

Aussi, de nombreux expérimentateurs ont réalisé soit des expériences portant sur des temps courts, soit des cultures sur sable, de longue durée, comportant des arrosages intermittents avec des solutions beaucoup plus concentrées que celles du sol. On ne trouve dans la littérature qu'assez peu de renseignements relatifs à l'influence de la concentration de solutions comparables à celles du sol sur la nutrition minérale, et les résultats obtenus par les divers auteurs sont souvent discordant (112). La plupart d'entre eux s'accordent à estimer indispensable une concentration minimum de 0,5 à 1 mg P par litre. Pour le potassium, les résultats sont beaucoup plus divergents, et dépendent notamment de la richesse des solutions en ions Ca^{++} et Mg^{++}. D'après les travaux de BARBIER, effectués à l'aide de solutions bien comparables à celles du sol, des concentrations de l'ordre de 5 à 10 mg K par litre sont nécessaires à l'obtention d'une croissance satisfaisante (113-114). Les concentrations minima varient d'ailleurs selon les espèces végétales.

On peut résumer très brièvement ainsi les principales conclusions relatives aux lois de la nutritions minérale dans des solutions pures (voir références 110 à 128) :

1° La concentration des solutions nutritives exerce une très grande influence sur la vitesse d'absorption des éléments minéraux. Il ne suffit pas que la plante ait à sa disposition une *quantité* suffisante d'ions nutritifs, ceux-ci doivent en outre se trouver à une concentration, ou à une *activité* convenable. Les concentrations minima compatibles avec une bonne alimentation des cultures sont, d'après les données bibliographiques et les quelques essais effectués, de l'ordre de 0,5 à 1 mg P par litre et 5 à 10 mg K par litre.

2° Si la vitesse d'absorption dépend de la concentration des solutions, elle ne peut pas être envisagée indépendamment de l'ensemble du métabolisme. Ce fait apparait particulièrement dans l'étude de l'absorption chez des plantes diversement carencées, dans l'absorption préférentielle du potassium, dans l'absorption des anions, et dans l'examen de la pression osmotique.

3° Deux mécanismes bien distincts se manifestent dans l'absorption :

— L'adsorption des ions à la surface des racines, qui représente une sorte de mise en équilibre de la plante avec le milieu nutritif. Les colloï-

des humiques accélèrent fortement cette adsorption, et paraissent jouer un rôle de transporteurs d'ions.

— L'absorption proprement dite, fonction de la quantité d'ions adsorbés, et de la production d'accepteurs.

4° La croissance n'est pas une fonction directe de l'absorption, mais le résultat de l'ensemble du métabolisme. L'absorption doit donc surtout permettre le métabolisme le plus actif possible. Le milieu nutritif est satisfaisant s'il met à la disposition de la plante des quantités suffisantes d'éléments minéraux, à une activité convenable, et dans un rapport correspondant aux besoins de la plante. Sinon, des ions peuvent être absorbés, mais non utilisés à la croissance.

5° La plante possède cependant des possibilités d'adaptation assez étendues, les racines jouant un rôle d'intermédiaires et de « tampons » entre le milieu et les parties aériennes où s'effectue l'essentiel des synthèses organiques. Mais, si les plantes peuvent subsister dans des milieux très variés, la croissance n'est active que dans des conditions répondant sensiblement aux besoins des cultures.

NUTRITION MINÉRALE DES PLANTES DANS LE SOL

I. — NUTRITION PHOSPHATÉE

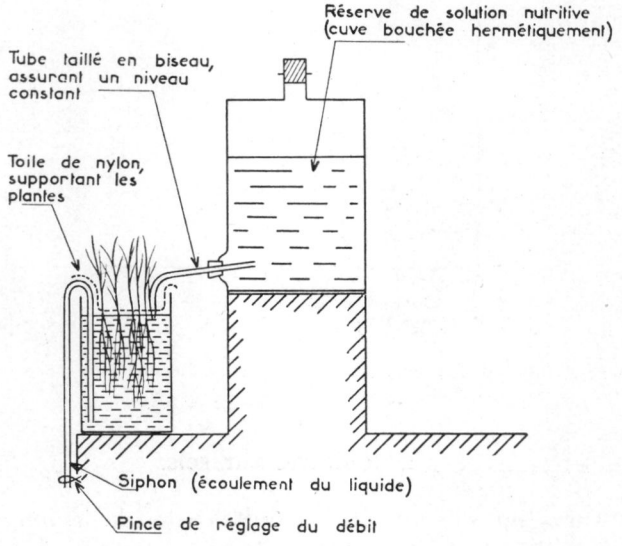
A. — Nutrition des plantes dans des solutions coulantes et dans des sols diversement enrichis.

Des cultures ont été faites en même temps dans des solutions coulantes de concentrations croissantes en P, et dans les sols diversement enrichis du Centre National de Recherches Agronomiques. Les équilibres sols-solutions, le travail de désorption et la cinétique de la dilution isotopique ont été particulièrement étudiés dans ces sols (deuxième partie de ce travail). Il est donc possible de comparer l'absorption du phosphore par les plantes, d'une part à la nutrition des mêmes plantes cultivées en solutions coulantes, dans des conditions exactement identiques de lumière, température, etc... et d'autre part aux caractéristiques énergétiques (activités, énergies d'adsorption, vitesses de dilution isotopique).

1° Cultures en solutions coulantes.

Les solutions nutritives utilisées dans cette étude étaient très riches en tous les éléments autres que P, de façon que l'absorption du phosphore ne soit limitée que par la concentration des ions PO_4, et éventuellement par la production de métabolites. Ces solutions contenaient :

N : 110 mg par litre, dont 77,7 mg N nitrique et 23,3 mg N ammoniacal (plus N ammoniacal apporté par les phosphates).
S : 120 mg
K : 150 mg
Ca : 75 mg
Mg : 44 mg
P : 0 ; 0,1 ; 0,14 ; 0,47 ; 1,9 ; 5,8 ; 22 et 94 mg par litre, introduits sous forme d'un mélange de phosphates mono et biammoniques.

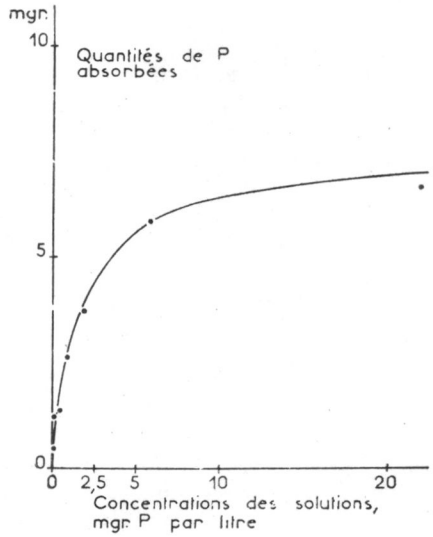


GRAPHIQUE 37. — Dispositif utilisé pour les cultures en solutions coulantes.

Les oligo-éléments étaient apportés en quantités convenables. Les cultures ont été réalisées en serre, dans des conditions très favorables de lumière et de température. Elles ont été poursuivies pendant dix-huit jours. Le renouvellement des solutions au contact des racines était assuré par le dispositif représenté sur le graphique 37 ; le débit était de l'ordre de trois litres de solution par jour et par lot de cent plants de blé. Des dosages fréquents de P en solution étaient effectués, afin de contrôler la constance des concentrations.

Le graphique 38 indique les quantités de P absorbées par les plantes. Comme dans l'essai précédent, on constate que la vitesse d'absorption augmente très fortement avec la concentration jusque vers 2mg/ litre P, de façon moins accentuée entre 2 et 5 mg /litre, assez faiblement au-delà de 5 mg /litre. Compte tenu des besoins particulièrement élevés de ces plantes

jeunes, on peut donc penser, en accord avec d'autres auteurs (112), que l'alimentation phosphatée peut s'effectuer correctement à partir de concentrations voisines de 1 mg P par litre.



GRAPHIQUE 38. — Quantités de P absorbées par les plantes, en fonction de la concentration du milieu.

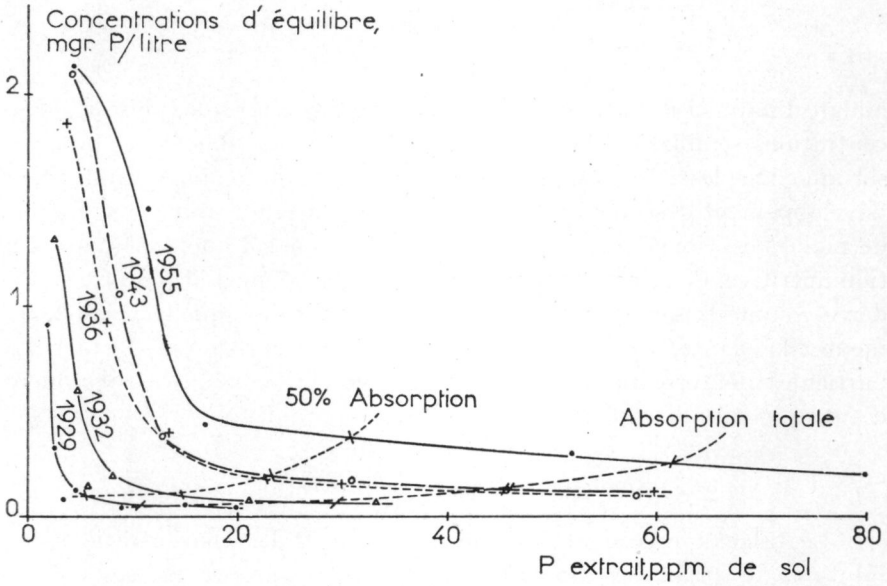
2° Cultures sur sols.

Les cultures sur sols ont été conduites selon la technique de Neubauer, c'est-à-dire 100 plants de blé végétant pendant 18 jours sur 100 gr de sol additionnés de 50 grammes de sable. Elles ont porté sur les prélèvements de 1929, 1932, 1936, 1943 et 1955. L'épuisement de ces sols est assez intense ; afin que la disponibilité du phosphore soit le seul facteur limitant la nutrition, les échantillons ont été additionnés de quantités d'azote et de potassium largement supérieures aux besoins des plantes.

a) PHOSPHORE ABSORBÉ ET CONCENTRATIONS DES SOLUTIONS DU SOL.

L'absorption du phosphore par les plantes a été d'autant plus grande que les sols ont reçu plus d'engrais phosphatés ; les quantités absorbées sont de l'ordre du quart des teneurs en P isotopiquement diluable total. Contraitrement aux cultures en solutions coulantes, l'absorption ne s'est pas effectuée dans le sol à des concentrations constantes des solutions, car celles-ci se sont appauvries au fur et à mesure que les réserves diminuaient, selon une loi approximative de désorption. Ce phénomène

rend assez difficile la comparaison des deux séries d'essais. En considérant la forme des courbes de désorption établies dans des solutions comparables à celles du sol (graphique 39), on peut cependant tenter une interprétation. Ces courbes présentent d'abord une portion rapidement décroissante, suivie d'une seconde portion dans laquelle les concentrations d'équilibre diminuent lentement et régulièrement au fur et à mesure de l'extraction. Les quantités totales absorbées se situent dans cette zone ; il en est de même pour les moitiés de ces quantités absorbées, portées égale-



GRAPHIQUE 39. — Concentrations en P des solutions à l'équilibre dans les sols diversement enrichis en fonction des quantités de P extraites, et absorption des plantes.

ment sur ce graphique. Entre 50 p. 100 et 100 p. 100 de l'abosrption, celle-ci s'est donc effectuée à des concentrations variant de façon presque linéaire, et l'on peut définir des concentrations moyennes approximatives :

$$Cm\ 50\%\ \text{à}\ 100\ \% = \frac{C\ 50\ \% + C\ 100\ \%}{2}$$

Ces concentrations moyennes C_m sont alors comparables aux concentrations des solutions coulantes ; les unes et les autres peuvent être grossièrement considérées comme constantes pendant 50 p. 100 de l'absorption. Les absorptions en solutions coulantes aux concentrations C_m sont lues sur la courbe du graphique 38, et rapportées, de même que les absorptions dans le sol, à l'unité de poids de racines (le développement des racines a

été notablement plus grand dans le sol que dans les solutions). Le tableau suivant indique la comparaison des demi-absorptions dans les sols et dans les solutions coulantes de même concentrations :

Sols, année du prélèvement	P absorbé (par gramme racines)	C 50% à à 100 %	50% absorption sols	50 % absorption solutions coulantes	C 100% (fin de cultures, sols)
1929	1,43 mg	0,07 mg P/l.	0,72 mg P	0,55 mg P	0,05 mg P
1932	3,55	0,07	1,78	0,55	0,06
1936	4,15	0,18	2,08	1,2	0,10
1943	5,6	0,17	2,8	1,25	0,13
1955	7,55	0,3	3,78	1,7	0,25

Malgré l'imprécision du calcul, il apparaît nettement que, pour des concentrations semblables, l'absoprtion a été beaucoup plus élevée dans les sols que dans les solutions coulantes, même en tenant compte du meilleur développement des racines dans le sol. L' « efficacité » d'un poids donné de racines est donc beaucoup plus grande dans le sol que dans une solution nutritive. Ce fait montre que la solution du sol ne doit pas être considérée comme la seule source d'ions PO_4 à partir de laquelle puisse s'alimenter la plante. Des phénomènes d'absorption directe au contact des particules de terre interviennent probablement, comme le confirment d'autres résultats rapportés ci-dessous.

b) Limites de l'absorption.

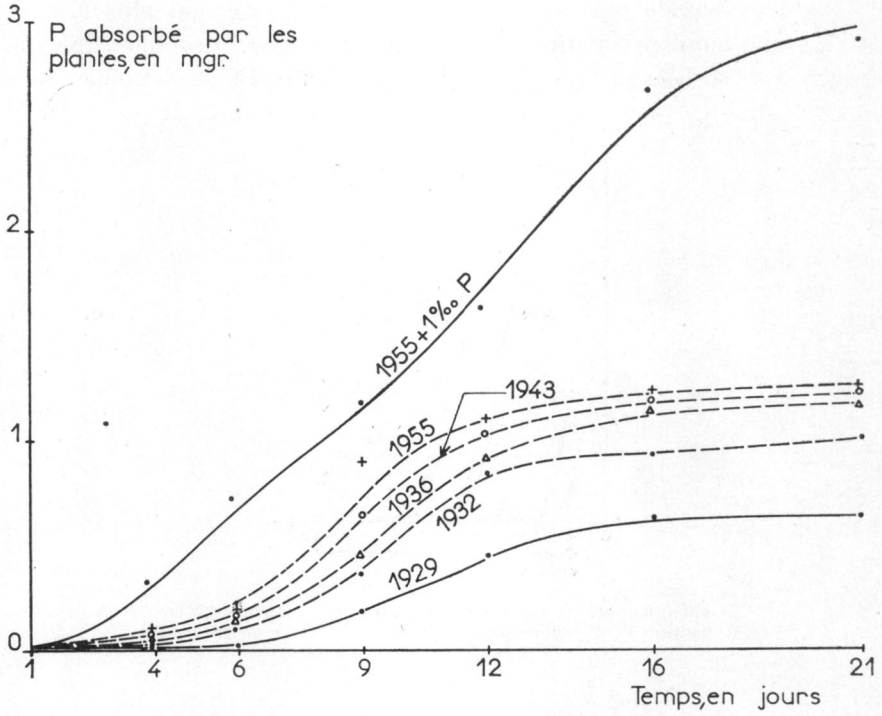
Le tableau précédent indique d'autre part les concentrations des solutions du sol à la fin des cultures. On peut remarquer que ces concentrations finales sont d'autant plus élevées que les sols ont été plus enrichis. Les plantes ont d'autre part absorbé davantage de phosphore dans ces dernier sols. On retrouve donc un phénomène comparable à celui qui a été observé chez les plantes carencées : plus les besoins du végétal sont intenses, plus il est capable d'absorber des ions de faible activité, plus fortement retenus par le sol. C'est également ce qui apparaît dans le calcul du travail nécessaire à la désorption des ions PO_4 absorbés. L'absorption s'est arrêtée lorsque le travail de désorption atteint, par ion-gramme, les valeurs suivantes :

1929 : 1 700 calories ;
1932 : 1 800 calories ;
1936 : 1 780 calories ;
1943 : 1 550 calories ;
1955 : 1 250 calories.

Ces valeurs sont du même ordre de grandeur et beaucoup moins variables que les concentrations des solutions du sol au moment de la

récolte ; cependant celles qui correspondent aux sols de 1943 et 1955 sont sensiblement plus faibles.

Si la culture avait été poursuivie plus longtemps, il ne semble pas que l'absorption ait dû être notablement augmentée : la récolte est faite au bout de 18 jours, dans la méthode de Neubauer, parce que les plantes n'absorbent plus guère au-delà. Le milieu est alors épuisé, ou, plutôt, les plantes ont atteint une sorte d'état d'équilibre, fonction à la fois de leurs besoins et de l'énergie d'adsorption des éléments par le sol. Ce dernier



GRAPHIQUE 40. — Quantités de P absorbées en fonction du temps, dans les sols diversement enrichis.

point ressort particulièrement du graphique 40, qui représente les résultats d'une autre série de cultures effectuées sur les mêmes sols, dans des conditions un peu différentes (8 plants de blé pour 20 grammes de sol et 20 grammes de sable ; température plus élevée). Cette expérience comportait en outre des échantillons du sol de 1955 ayant reçu en plus 1 p. 1000 de phosphore, c'est-à-dire d'une richesse considérable. Or, le graphique montre que l'absorption est d'autant plus rapide que les sols ont été plus enrichis ; mais dans tous les cas, elle est sensiblement arrêtée à partir de 18 jours. On peut donc considérer que la quantité d'ions PO_4 absorbée dans les essais de Neubauer est relativement bien définie.

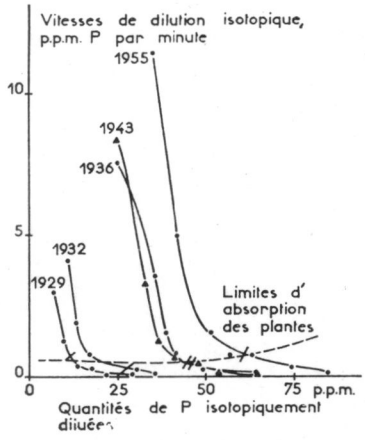
c) Absorption et vitesse de dilution isotopique.

Lorsque l'on représente les vitesses de dilution isotopique des ions PO_4 du sol en fonction des quantités de P isotopiquement diluées, on obtient des courbes reflétant les deux phases de la dilution isotopique, c'est-à-dire :

— une première portion de courbe dans laquelle la pente des tangentes est très grande (en valeur absolue) ;

— une seconde portion où les pentes sont beaucoup plus faibles.

Le graphique 41 indique cette représentation. Les quantités de phosphore absorbées par les plantes au cours des essais de Neubauer sont



Graphique 41. — Vitesses de dilution isotopique en fonction des quantités de P isotopiquement diluées, et absorption des plantes.

en outre portées en abscisses. Dans tous les cas, elles correspondent sensiblement aux points à partir desquels les courbes s'infléchissent fortement, et où la vitesse de dilution n'atteint plus 0,5 p. p. m. P par minute. Le temps nécessaire à la dilution isotopique d'une quantité d'ions PO_4 égale à celle qui a été absorbée par les plantes est voisin de 15 minutes (graphique 33, mémoire précédent).

Ainsi, les quantités de phosphore absorbées par ces cultures apparaissent bien définies,

— d'une part à l'égard de la plante, puisque celle-ci atteint alors son « état d'équilibre » avec le milieu ;

— d'autre part à l'égard du sol : la fraction absorbée est celle qui se dilue isotopiquement avec une vitesse élevée, c'est-à-dire en un temps court.

d) Conclusions.

Pour considérer la disponibilité des réserves phosphoriques de ces sols à l'égard des plantes, dans des conditions d'épuisement intense, le critère de vitesse de dilution isotopique apparait bien meilleur que celui de concentration de la solution du sol. Celui de travail nécessaire à la désorption possède une valeur intermédiaire ; il est bien supérieur à la cencontration, mais inférieur à la vitesse de dilution isotopique. Celle-ci est d'ailleurs une fonction relativement simple de $\Delta\overline{G}'$ (graphique 35), et sans relation avec les concentrations de désorption (graphique 36, mémoire précédent).

L'ensemble de ces résultats très divers est donc cohérent. L'absorption des ions PO_4 au cours de l'épuisement par les plantes dépend principalement de leur *mobilité*, exprimée par la vitesse de dilution isotopique. Cette mobilité est surtout fonction de l'énergie d'adsorption, mais elle peut être limitée aussi par des facteurs stériques (diffusion à l'intérieur des particules de terre). Cela explique que le travail de désorption rende moins bien compte de la nutrition végétale que la cinétique de dilution isotopique, qui résulte à la fois des facteurs stériques et énergétiques. La désorption des ions PO_4 étant lente, il est d'ailleurs logique que des études cinétiques indiquent mieux leur disponibilité que des études statiques d'équilibres sols-solutions. Il peut en aller différemment dans le cas du potassium, où les équilibres de désorption sont au contraire très rapidement atteints. Les résultats peuvent être aussi quelque peu différents lorsque l'un réalise un épuisement moins intense du sol.

Du point de vue technique, la mesure du travail de désorption à partir des équilibres sols-solutions représente un travail très long et délicat. La détermination des vitesses de dilution isotopique est au contraire assez simple et rapide ; cette méthode est donc la meilleure, et d'autre part la plus accessible.

B. — Examen de divers types de sols cultivés.

Afin de rechercher dans quelle mesure les résultats obtenus dans le sols de Versailles peuvent être généralisés, considérons maintenant la nutrition des plantes dans divers types de sols. La façon la plus sûre dévaluer le degré de disponibilité de ces réserves à l'égard des plantes est de considérer le comportement des plantes elles-mêmes, c'est-à-dire les rendements obtenus et la réaction des cultures aux engrais phosphatés.

a) Sols granitiques.

Les sols étudiés, dans lesquels l'alimentation phosphatée est le principal facteur limitant les rendements, appartiennent à un même terroir. Initialement très pauvres en phosphore, ils ont été diversement

enrichis par des apports d'engrais, selon les pratiques culturales auxquelles ils ont été soumis. Grâce à leur homogénéité, cet ensemble de sols constitue un excellent matériel expérimental lorsque l'on se propose de tester la valeur de diverses méthodes d'étude de leurs réserves phosphoriques (108).

Ces sols sont riches en éléments grossiers, ainsi que l'indique leur composition moyenne calculée par rapport à la terre totale, non tamisée :

Cailloux et graviers	35 à 40 %
Sable grossier	30 à 35 %
Sable fin	15 %
Limon	10 %
Argile	4 à 8 % (soit 7 à 14 % de terre fine inférieure à 2 mm).

Ces sols étaient initialement acides ; grâce aux apports d'amendements calcaires leur pH est maintenant voisin de la neutralité. Ils sont exploités en polyculture ; les rendements en blé varient approximativement entre 15 et 40 quintaux hectare. Le tableau suivant indique les principales caractéristiques de quelques échantillons de valeurs culturales variables. La composition de tous ces sols est sensiblement la même : teneurs en argile, matières organiques, pH... Par contre, leur richesse en phosphore

N°	Niveau phosphorique	Principales caractéristiques				Dilution isotopique			Concentration d'équilibre, sol/eau = 1/4
		Argile %	CO_3Ca %	Matières organiques	pH	P dilué en 15 mn p. p. m.	P dilué en 3 jours p. p. m.	P dilué en 15 mn % de P dilué en 3 j	
1	bon	12,8	0	2,6 %	6,9	20	132	15,2 %	0,8
2	bon	9,7	0	2,25	7,05	16,5	104	15,8	1,3
3	bon	13,3	0	3,9	6,7	15,5	114	13,5	1,05
4	moyen	11,2	0	3	7,2	20	48	42	0,48
5	moyen	7,2	0	4,1	6,75	9,2	36	25,5	0,4
6	moyen	8,8	0	2,95	6,6	8,5	37	23	0,38
7	assez faible	10,3	0	2,75	6,8	8	32	25	0,55
8	assez faible	8,8	0	2,5	6,95	5,5	28	19,7	0,5
9	faible	9,5	0	3,1	6,6	3,6	29,5	12,2	0,14
10	faible	9	0	2,4	7,05	6	39	15,4	0,3

varie considérablement, tant en P isotopiquement diluable en 15 minutes qu'en P isotopiquement diluable total. Ces deux données varient dans le même sens, mais la proportion de P diluable en temps court est plus forte dans les sols moyens que dans les sols riches. Les teneurs en P sont très faibles dans les sols de niveau moyen ou bas, quoique les concentrations d'équilibre restent relativement élevées. Le pouvoir adsorbant de ces terres à l'égard des ions Po_4 est donc peu intense.

La valeur culturale de ces sols est exprimée par les rendements en fourrages de prairies artificielles (trèfle, luzerne, ray-grass) plutôt qu'en blé, pour éviter que l'azote ne soit un facteur limitant. Ces rendements représentent les meilleures récoltes obtenues durant vingt ans, en années

météorologiques favorables. On peut donc examiner les corrélations qu'ils présentent avec les diverses caractéristiques relatives aux réserves phosphorique : P isotopiquement diluable total, P isotopiquement diluable en temps court, concentration de la solution du sol. On ne peut toutefois pas calculer des coefficients de corrélation, car les rendements ne sont pas une fonction linéaire de la richesse phosphorique, ils obéissent plutôt à la loi des rendements moins que proportionnels. Il est donc préférable d'examiner graphiquement le groupement des points en une relation aussi étroite que possible.

Une telle relation entre les rendements et les quantités de phosphore isotopiquement diluable total est faible. Elle est meilleure lorsque l'on considère la quantité isotopiquement diluable en temps court (quinze minutes), ou la concentration des solutions du sol. Cependant, l'étude détaillée des graphiques montre que l'on obtient la relation la plus étroite si l'on tient compte à la fois de ces deux données : P diluable en 15 minutes, et concentration de la solution du sol. Tout se passe comme si la concentration représentait un terme correctif par rapport à la teneur en ions PO_4 très mobiles.

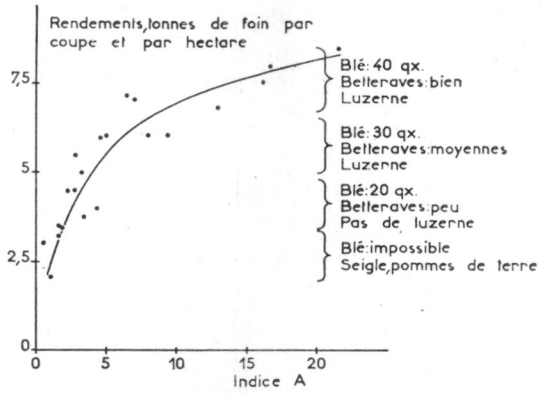
On doit remarquer que la vitesse de dilution isotopique (ou, ce qui revient sensiblement au même, la quantité de P isotopiquement diluable en temps court), est fonction du travail nécessaire pour obtenir la désorption à une activité donnée, mais non de la valeur absolue de cette activité. Or, la nutrition des plantes dépend de la mobilité des ions PO_4, mais aussi de leur activité, ainsi que l'ont montré les essais effectués en solutions pures. Lorsque l'on réalise un épuisement intense du milieu à l'aide de plantes jeunes dont les besoins sont très élevés, l'absorption totale dépend assez peu de la concentration de la solution du sol. Si l'on envisage au contraire l'alimentation des plantes tout le long de leur cycle végétatif, cette alimentation devant permettre la croissance la plus active possible, la conclusion est quelque peu différente. L'interprétation cinétique de l'absorption montre que la concentration doit être alors suffisamment élevée, afin que les « accepteurs » soient rapidement pourvus en ions PO_4.

La vitesse d'absorption des ions PO_4 dans le sol, qui est ici la condition essentielle de la croissance, dépend donc de leur activité dans le système sol-solution, et de leur énergie d'adsorption. La considération simultanée de ces deux facteurs, sous forme d'un indice tel que :

$$A = \begin{pmatrix} \text{p.p.m. P. isotopiquement} \\ \text{diluées en 15 mn} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{mg P par litre de solution} \\ \text{rapport sol/eau} = 1/4 \end{pmatrix}$$

rend bien compte de l'alimentation des plantes dans ces sols granitiques (graphique 42). Selon la valeur du niveau phosphorique ainsi-défini, les cultures donnent des résultats variables ; les plus exigeantes,

par exemple la luzerne et la betterave, sont impossibles lorsque les sols sont trop pauvres. On remarque d'après la courbe que les rendements augmentent très fortement avec l'indice A tant que celui-ci est inférieur à environ 8. L'augmentation est ensuite beaucoup moins accentuée, la



GRAPHIQUE 42. — Valeurs culturales en fonction des indices A (sols granitiques).

réaction aux engrais devient de plus en plus faible. Ce seuil de 8 indique donc ici la limite des besoins assez élevés en engrais phosphatés.

On peut examiner, sur quelques exemples, comment interviennent les deux facteurs de l'indice A :

Rendements tonnes de foin /hectare	P dilué en 15 mn p. p. m.	Concentrations d'équilibre	A
8,5	16,5	1,3 mg P/ litre	21,5
8	15,5	1,05	16,5
7,5	20	0,8	16
6	20	0,48	9,6
6	6,1	0,82	5
5	8,5	0,38	3,2
4,5	5,5	0,5	2,8
4	8	0,55	4,4
3,5	6	0,3	1,8
3	3,6	0,14	0,5

Les quantités de P isotopiquement diluables en 15 minutes sont de l'ordre de grandeur des besoins d'une culture : 10 p. p. m. P représentent, par hectare, pour 4 000 tonnes de terre, 40 kg P (les exportations des récoltes sont d'ailleurs d'autant plus faibles que les sols sont plus pauvres, et les rendements moins élevés). Dans les derniers échantillons, ces teneurs en ions PO_4 suffisamment mobiles apparaissent faibles par rapport aux exigences d'une bonne récolte.

Ces ions PO_4 doivent, en outre, se trouver à une activité suffisante : on obtient ici une assez forte réaction aux engrais à partir de concentra-

tions de solutions du sol voisines de 0, 5 mgr P par litre. D'après divers auteurs (112), c'est également l'ordre de grandeur des concentrations minima compatibles avec une bonne alimentation en solutions coulantes. Dans ces sols de pouvoir adsorbant peu intense, la nutrition des plantes n'apparaît donc pas foncièrement différente de la nutrition en solutions pures, à la condition que les réserves en ions PO_4 faiblement liés soient suffisantes.

b) Sols de limon.

Grâce à leur haute capacité de production, les sols de limon font généralement l'objet de cultures intensives, et l'on trouve rarement dans ce groupe des sols véritablement carencés en phosphore.

Les résultats obtenus sur quelques-uns de ces sols sont indiqués ci-

Nos	Principales caractéristiques des sols				Dilution isotopique		Concentration d'équilibre sol/eau 1/4	A
	Argile %	CO_3Ca %	Mat. org. %	pH	P dilué 3 jours	P dilué 15 min.		
1	8,8	0,14	1,4	7,6	68 ppm	21 ppm	1,08 mg P/1	22,7
2	18,7	0,3	1,6	7,9	89	28	0,52	14,5
3	12,7	0,4	2,1	—	62	17	0,66	11,3
4	14,7	0,15	4,8	5,2	150	44	0,25	11
5	12,2	1	2,2	8,1	62	19	0,37	7

dessous. Les échantillons proviennent de la Station Agronomique de LAON. Il s'agit de terres possédant une haute valeur culturale, et convenablement pourvues en phosphore.

Les diverses données relatives au phosphore de ces sols varient considérablement, notamment les concentrations des solutions d'équilibre (0,25 à 1,08 mg P par litre). Leur pouvoir adsorbant est variable, et parfois assez grand : ainsi, le sol nº 4, quoique riche en ions PO_4 adsorbés,

Nos	Dilution isotopique 15 mm.	Concentrations d'équilibre sol/eau = 1/4	A
1	49 ppm	0,14 mg P/l	6,9
2	19	0,34	6,5
3	27	0,23	6,2
4	16	0,18	2,9
5	7,7	0,16	1,25

possède une solution relativement diluée. Les indices A sont tous élevés ; leurs valeurs absolues concordent, pour indiquer une faible réaction aux engrais, avec celles obtenues dans les meilleurs sols granitiques.

Considérons maintenant une autre série de sols de limon, provenant de la Station Agronomique de ROUEN. Ces sols, quoique en bon état cultural, présentent un niveau phosphorique faible.

On observe encore une grande variabilité des concentrations d'équilibre et des teneurs en ions PO_4 isotopiquement diluables en un temps court. Les indices A sont plus faibles que dans le groupe précédent, bien que l'activité ou la mobilité, considérées isolément, reflètent mal l'insuffisance du niveau phosphorique.

Dans les sols de limon, de pouvoir adsorbant plus élevé que celui des terres granitiques, les plantes s'accommodent bien de faibles concentrations d'équilibre, si la réserve d'ions PO_4 très mobiles est suffisante. L'alimentation des plantes est donc ici nettement différente de celle que l'on observe en solutions pures.

c) Sols calcaires.

Le problème de la détermination des réserves phosphoriques dans les sols calcaires est particulièrement important et délicat : la plupart des méthodes chimiques de dosage reposent sur des extractions effectuées à l'aide d'acides dilués, qui détruisent le calcaire, et dissolvent éventuellement les précipités de phosphates calciques peu utilisables par les plantes. Nous avons étudié par les techniques de dilution isotopique plusieurs catégories de sols calcaires : sols de culture intensive renfermant des proportions variables de calcaire, sols crayeux de Champagne, sols marneux très carencés en phosphore.

Les résultats relatifs à quelques sols de grande culture sont indiqués ci-dessous (échantillons provenant des stations d'Amiens et de Laon) :

Niveau phosphorique	Sols			Dilution isotopique			Concentrations d'équilibre sol/eau = 1/4	Indice A
	Argile %	CO_3Ca %	Mat organ. %	P dilué en 15 mn p. p. m.	P dilué 3 jours p. p. m	P dilué en 15 mn % de P 3 jours		
		%	%			%	P/cm³	
moyen	6,6	10	3,9	20	59	39	0,34 g	6,8
assez bon..	17,7	28,4	5,4	19	78	24,5	0,34	6,5
faible	11,5	39,4	2,6	9,5	52	18,3	0,18	1,7
moyen.....	4,3	51,8	1,97	15,5	84	18,5	0,3	4,7

La présence de quantités croissantes de calcaire ne modifie pas la cinétique de la dilution isotopique : une proportion élevée des ions PO_4 se dilue toujours en un temps court. Les valeurs absolues des quantités de P isotopiquement diluables en 15 minutes ou en 3 jours sont de même ordre que dans les sols précédents. L'indice A rend bien compte du niveau phosphorique (comparer aux sols granitiques et aux sols de limon).

Une série de sols crayeux de Champagne, provenant de la Station Agronomique de Châlons-sur-Marne, offre un exemple particulièrement intéressant. Ils sont de composition très voisine, assez riches en matières

organiques, et très pauvres en argile (environ 5 p. 100). Leur teneur en calcaire est extrêmement élevée, elle varie de 67 à 79 p. 100. Les rendements en blé sont de l'ordre de 15 à 40 quintaux /hectare, selon la richesse des sols.

De même que dans les autres sols, une fraction importante des ions PO_4 se dilue isotopiquement en un temps court ; elle varie dans le

Besoin en engrais	Teneur en calcaire	Dilution isotopique			Concentrations d'équilidre sol/eau = 1/4	Indices A
		P dilué 15 mm p. p. m.	P. dilué 3 j. p. p. m.	P. dilué 15 mm % P 3 jours		
Faible	79,2	15,5	75	21 %	0,5 mgP /L	7,8
	67,3	19	62	31	0,38	7,2
Modéré	66,5	15,5	51	30	0,27	4,2
	73,5	16	54	30	0,13	2.1
Assez important ..	66,8	10	68	14,5	0,165	1,65
	77,6	12	88	13,5	0,12	1,4
	75,1	10	67	15	0,09	0,9
	67,1	7	58	12	0,07	0,5
Très important ...	73,9	10,5	48	22	0,087	0,9
	71,7	7,5	31	24,5	0,1	0,75

même sens que la quantité totale adsorbée. Dans l'ensemble, les concentrations d'équilibre sont toutefois beaucoup plus faibles, ce qui indique des adsorptions intenses.

L'alimentation est bien liée ici aux concentrations d'équilibre, ou à l'indice A. Ces concentrations d'équilibre sont cependant très faibles, celles qui correspondent à un besoin modéré d'engrais (0,2 mg P /litre) seraient très insuffisantes dans les sols granitiques, où, pour des bsoins comparables, les concentrations sont de l'ordre de 0,5 mg P par litre. Les valeurs de A rendent mieux compte du niveau phosphorique, le seuil de réaction se situant ici encore vers 5 à 7.

Dans des sols marneux de Provence fortement carencés en phosphore, où des cultures très maigres sont seules possibles, on observe des concentrations et des indices A extrêmement faibles, quoique les quantités de P isotopiquement diluables en temps court restent comparables à celles rencontrées dans les sols précédents :

P. dilué en 15 mn. p. p. m.	Concentrations d'équilibre	A
11,3	0,032	0,36 mg P/l
8,3	0,063	0,52
13	0,063	0,82
4,2	0,046	0,19

Les sols riches en calcaire tendre, craie ou calcaire marneux, se caractérisent donc par des concentrations très faibles des solutions du sol, quoique les réserves d'ions PO_4 adsorbés soient assez importantes.

d) Sols tropicaux a évolution latéritique.

Ce phénomène est encore plus accusé dans certains sols tropicaux (sols ferrugineux tropicaux ou sols latéritiques), qui renferment de grandes quantités d'hydroxydes métalliques. Des sols des Antilles, dans lesquels la culture de la canne à sucre est conduite de manière intensive, ont été examinés par les techniques habituelles.

Ces sols ont reçu des fumures abondantes, et ne semblent pas réagir fortement aux engrais phosphatés.

On rencontre dans l'étude de ces terres de grandes difficultés analytiques, car les solutions de ces sols sont extrêmement diluées, et le dosage chimique du P dans les solutions d'équilibre s'avère particulièrement délicat. Les teneurs en P isotopiquement diluable total ont toutefois pu être déterminées de façon plus précise, au moyen de la méthode Larsen (131), qui consiste à cultiver des plantes sur le sol additionné de ^{32}P. Du rapport $^{31}P/^{32}P$ dans la plante, que l'on peut déterminer facilement, on déduit, connaissant la radioactivité totale introduite, la quantité de P isotopiquement diluable du sol.

Le tableau ci-dessous indique quelques exemples des valeurs rencontrées :

P isotopiquement diluable total (valeurs Larsen)	mg P par litre de solution sol/eau = 1/4
a) Sols peu évolués, sur alluvions ou roches volcaniques :	
196 ppm	0,2
216	0,08
b) Sols plus évolués, à hydroxydes de fer.	
140	0,07
182	0,04
c) Sols latéritiques.	
593	0,02
134	0,03

Ces teneurs en ions PO_4 adsorbés, isotopiquement diluables, sont assez élevées. Mais le pouvoir adsorbant très intense de ces sols fait que leur degré de saturation en P (149) est faible, et leurs solutions sont extrêmement diluées. Cette dilution croît d'ailleurs au fur et à mesure que les sols évoluent vers l'état latéritique. Une part importante des ions PO_4 adsorbés est cependant suceptible de se diluer isotopiquement en un temps court ; quoique l'activité de ces ions soit très faible, en raison du grand pouvoir adsorbant, leur mobilité demeure élevée. Ces indices A sont difficiles à déterminer de façon précise, mais leur ordre de grandeur est le même que dans les sols tempérés.

La canne à sucre, culture la plus répandue dans ces sols, est une plante assez peu exigeante en phosphore, puisque ses besoins sont estimés à

15-20 kg P par ha et par an. Ces exigences doivent néanmoins être satisfaites, et la très faible concentration des solutions de ces sols semblerait indiquer un niveau phosphorique très insuffisant. Or, les rendements, sans être très élevés, demeurent corrects ; l'alimentation phosphatée des plantes est donc suffisante pour permettre ces rendements.

c) Conclusions.

L'examen de ces types de sols très différents montre que, dans ceux qui possèdent un faible pouvoir adsorbant (sols granitiques), l'alimentation phosphatée des plantes est assez comparable à celle que l'on observe en solutions pures. Des concentrations voisines de 0,5 mg P par litre peuvent assurer des rendements convenables, à la condition, toutefois, que les réserves faiblement liées soient suffisantes pour que cette concentration ne diminue pas notablement sous l'effet de l'absorption des plantes.

Dans les sols de pouvoir adsorbant élevé, les plantes peuvent s'alimenter à partir de solutions du sol fortement diluées si la richesse en ions PO_4 très mobiles est suffisante. Par divers mécanismes : excrétion d'ions $H,^+$ d'acides organiques... les plantes modifient probablement le sol au contact de leurs racines, augmentant vraisemblablement ainsi l'activité des ions PO_4. La solution « moyenne » du sol, telle qu'elle est obtenue à partir d'une suspension de terre, peut être assez différente des solutions « locales » dans lesquelles se fait réellement l'absorption. La libération d'ions H^+, en particulier, peut jouer un rôle important en augmentant l'activité des ions PO_4 au contact des racines.

Quels que soient les mécanismes susceptibles de modifier ainsi les conditions globales du sol, on peut, à partir des caractéristiques moyennes, estimer correctement le niveau des réserves phosphoriques des sols en considérant à la fois la concentration de la solution et la teneur en ions PO_4 isotopiquement diluables en temps court. Le produit de ces deux données, assez arbitraire dans sa définition, rend cependant bien compte des possibilités alimentaires du sol.

D'autres auteurs (R. S. Russel, E. W. Russel, Marais, 1957, 131) paraissent s'orienter vers une conclusion du même ordre : ils ont établi que la détermination du stock de P isotopiquement diluable est insuffisante, et ils suggèrent de lui adjoindre celle du « potentiel phosphorique » (132), c'est-à-dire, en fait, de l'activité. Le principe de cette évaluation du niveau phosphorique serait en accord avec les travaux exposés ici, mais l'examen de la *cinétique* de la dilution isotopique semble beaucoup plus important que celui de la quantité totale de P isotopiquement diluable.

II. — NUTRITION POTASSIQUE

A. — Nutrition des plantes dans les solutions coulantes et dans les sols diversement enrichis.

De même que pour le phosphore, il est possible de comparer l'absorption du potassium à partir de solutions coulantes et à partir des sols diversement enrichis de Versailles, des cultures ayant été faites en même temps sur ces deux substrats.

1° Cultures en solutions coulantes.

Des essais ont été réalisés dans des solutions de concentrations croissantes en potassium, selon les mêmes techniques que pour le phosphore. Les solutions, très riches en tous les éléments autres que K, renfermaient :

N : 98 à 152 mg par litre, dont 84 à 138 mg N nitrique et 14 mg N ammoniacal.

P : 23,3 mg par litre ;

S : 40 à 101,5 mg par litre ;

Ca : 120 mg par litre ;

Mg : 30 mg par litre ;

K : 0 ; 3,5 ; 10 ; 40 ; 100 et 300 mg par litre, apportés sous forme de SO_4K_2 et NOK_3.

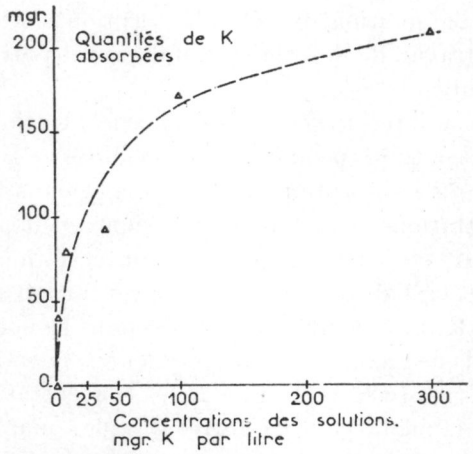
Les quantités de potassium absorbées à ces diverses concentrations sont portées sur le graphique 43. Elles augmentent considérablement avec la concentration jusque vers 10 mg K par litre, de façon moins marquée entre 10 et 30 à 40 mg /litre, puis beaucoup plus faiblement, quoique de manière non négligeable, jusqu'à 300 mg /litre. On observe alors un enrichissement considérable des plantes en potassium, la teneur en cet élément atteignant 6 p. 100 de matière sèche.

L'absorption est particulièrement intense aux concentrations inférieures à 10 mg K par litre. C'est précisément l'ordre de grandeur des taux de potassium compatibles avec une croissance active des plantes (112, 113). Dans les solutions plus riches, la plante absorbe davantage de potassium, mais cet excès n'est pas toujours indispensable à la croissance, il peut s'agir de consommation de luxe.

2° Cultures sur sols.

Les sols ont été épuisés selon la technique de Neubauer ; ils ont été additionnés d'azote et de phosphore, afin que tous les éléments autres que K soient largement présents dans le milieu. Des échantillons du sol de 1955 ont en outre reçu 0,25 p. 1 000 de K, pour réaliser un enrichissement encore plus considérable.

Les plantes ont absorbé d'autant plus de potassium que les sols avaient reçu plus d'engrais : les quantités absorbées varient de 16 à 270 p. p. m. Ces quantités absorbées représentent environ 75 p. 100 des teneurs en K échangeable, sauf dans le sol de 1929 où cette proportion n'atteint que 26 p. 100. On ne peut pas affirmer que l'alimentation ne s'est effectuée qu'aux dépens du potassium échangeable, des régénérations de celui-ci à partir des ions K^+ rétrogradés ayant pu intervenir même pendant ce temps relativement court. Il est néanmoins permis de penser que l'absorption a porté surtout sur les ions échangeables, qui sont beaucoup plus mobiles. (Cette hypothèse est très difficile à vérifier, car on ne dispose pas d'isotope radioactif de période suffisamment longue ;



GRAPHIQUE 43. — Quantités de K absorbées par les plantes, en fonction de la concentration des solutions.

l'interprétation des résultats est donc moins sûre que dans le cas du phosphore.)

D'après les équilibres de désorption rapportés ci-dessus (mémoire précédent), et en admettant l'alimentation aux dépens du potassium échangeable, les concentrations des solutions du sol à la fin des cultures seraient les suivantes :

N°	Année de prélèvement	K absorbé dans les sols		Concentrations c_f en fin de culture	Travail de désorption Cal/ion-gr	K absorbé en solutions coulantes aux concentrations c_f
		ppm sol	mgr			
1	1929	16	1,6	2,5 mgr/l	650	27 mgr
2	1932	105	10,5	2,3	1 200	25
3	1936	145	14,5	4,7	1 000	43
4	1943	154	15,4	6	970	52
5	1955	270	27	10	1 030	65
6	1955 + K	400	40			

L'adsorption s'est donc interrompue à des concentrations d'autant plus élevées que les sols étaient plus enrichis. Les plantes n'étaient cependant pas « saturés » de potassium puisque, dans l'échantillon (1955 + K) elles en ont absorbé davantage. On retrouve ainsi l'influence des deux principaux facteurs de la nutrition minérale, la concentration du milieu et les besoins de la plante. Dans le sol de 1955, les cultures ont absorbé beaucoup plus de potassium que dans les échantillons précédents, mais l'absorption ne s'est pas poursuivie jusqu'à des concentrations aussi faibles. De même, 52 p. 100 seulement de l'excédent de potassium apporté à l'échantillon nº 6 a été prélevé. Les besoins des plantes étant plus faibles dans ces deux derniers cas, l'épuisement des sols a été moins intense. Dans le sol de 1929, la nutrition potassique semble avoir été limitée par la trop faible concentration de la solution du sol. L'absorption s'est en effet arrêtée à des valeurs du travail de désorption notablement plus petites que dans les échantillons suivants.

D'après les équilibres de désorption, la concentration de ces solutions a varié de façon continue pendant toute la durée des cultures et il est difficile de comparer l'absorption dans les sols et dans les solutions coulantes. A concentrations égales, il semble bien cependant que la nutrition dans le sol ait été notablement moins intense qu'en solutions coulantes. Dans celles-ci, l'absorption à une concentration de 2,5 mg /l est de l'ordre de 25 mg K. Les quantités absorbées dans les sols de 1929 et 1932 par un même poids de racines sont très inférieures, bien que la plus grande partie de l'absorption se soit effectuée à des concentrations plus élevées. La conclusion est la même pour les autres sols : les quantités de K absorbées en solutions coulantes à des concentrations égales à celles que l'on rencontre dans les sols en fin de culture sont bien supérieures aux absorptions dans les sols eux-mêmes (colonnes 1 et 4).

De tels phénomènes d'absorption moins intense du potassium en présence des colloïdes du sol qu'en solutions pures ont été observés par d'autres auteurs (133, 134). L' « effet de contact » est donc de sens inverse à celui que l'on rencontre dans le cas des ions phosphoriques. Il faut noter toutefois que l'épuisement est ici plus intense. Or, les sols étaient maintenus humides, mais non en suspension, et il n'est pas sûr que toutes les particules de terre aient été uniformément exploitées ; les particules les plus proches des racines ont pu être épuisées plus fortement que celles qui se trouvaient éloignées.

Qu'il s'agisse de l'hétérogénéité du sol ou de phénomènes énergétiques modifiant l'alimentation en présence des colloïdes (134), le concept de solution globale du sol apparaît de toutes façons insuffisant dans cette expérience pour rendre compte de la nutrition potassique. Il importe de considérer maintenant cette nutrition dans les conditions culturales réelles, qui correspondent à des épuisements beaucoup moins rapides.

B. — Nutrition potassique dans divers sols cultivés.

Ce problème a été principalement étudié sur les sols des champs d'essais de la Société Commerciale des Potasses d'Alsace, dont quelques uns sont décrits par ailleurs (150). Ces champs d'essais permanents comprennent des parcelles K_0 cultivées sans aucun apport d'engrais potassiques, des parcelles K_1, dans lesquelles les exportations des récoltes sont sensiblement compensées, et des parcelles K_2 recevant des doses d'engrais supérieures aux exportations. Les épandages d'engrais azotés et phosphatés sont uniformes et abondants, de façon que l'alimentation potassique soit le principal facteur limitant la croissance des plantes. Plusieurs cultures sont effectuées chaque année sur ces parcelles. Les services d'expérimentation de la Société ont bien voulu mettre à notre disposition l'ensemble des résultats culturaux ; on peut donc les comparer aux diverses caractéristiques obtenues dans l'étude des équilibres sols-solutions.

Un premier caractère apparaît dans l'examen de la réaction des cultures aux apports d'engrais potassiques : la variabilité de cette action selon les espèces végétales. Ainsi, il est très fréquent que, dans un même sol, des apports d'engrais n'augmentent que peu les rendements en blé (10 à 20 p. 100), alors que les rendements en pommes de terre sont doublés ou triplés (135). Les céréales, et notamment le blé, sont capables d'absorber suffisamment de potassium pour fournir des rendements élevés, même dans des sols très pauvres. Ainsi, dans les parcelles K_0 de tous les champs d'essais examinés ci-dessous, on a noté en 1955 des rendements en blé variant de 40 à 50 quintaux-hectare. Par contre, la croissance des pommes de terre, des betteraves et des cultures fourragères a été fréquemment limitée par la nutrition potassique. La différence de comportement de ces diverses espèces est due en partie à leurs besoins variables de potassium.

Quoique les betteraves présentent des besoins plus élevés que les pommes de terre, c'est généralement sur ces dernières que l'on note la plus forte action des engrais potassiques. Les espèces cultivées possèdent donc à des degrés divers la faculté d'utiliser les réserves du sol. Cette utilisation dépend tout d'abord de l'extension du système radiculaire, et du volume de terre qu'il exploite. Ainsi, les racines de la pomme de terre se développent surtout au voisinage de la surface, alors que celles de la betterave et de la luzerne sont abondantes en profondeur. D'autre part, la constitution des racines peut intervenir également : les racines des céréales ont une faible capacité d'échange de cations, et la nutrition potassique en serait facilitée (19).

a) Corrélations entre les résultats de divers tests chimiques et la réaction des cultures aux engrais potassiques.

Les principaux résultats concernant les corrélations entre la réaction des cultures aux engrais potassiques et les divers tests par lesquels on peut caractériser le niveau des réserves potassiques du sol ont été publiés par ailleurs (150). Nous en rappelons ici les conclusions essentielles :

— La corrélation entre la concentration en K de la solution du sol et la réaction aux engrais potassiques est sensiblement nulle.

— La corrélation entre la teneur en K échangeable et la réaction aux fumures est peu élevée. Elle n'est pas améliorée si l'on tient compte de la teneur du sol en argile, ni de la faculté de régénération du potassium rétrogradé (étudiée par des moyens chimiques).

— La corrélation entre énergie d'adsorption du potassium et réaction aux engrais est très faible.

— Les corrélations les plus élevées, très significatives, sont obtenues en considérant la proportion de potassium parmi les cations échangeables du sol, et notamment le rapport K/ T. Dans les sols peu acides, la corrélation est sensiblement la même si l'on envisage simplement le rapport K /S, ou même K /Ca (T désigne la capacité d'échange à pH7, S la somme des cations métalliques échangeables, K et Ca les teneurs en potassium et en calcium échangeables ; toutes ces valeurs sont naturellement exprimées en milli-équivalents).

Ainsi, la concentration en K de la solution du sol est sans grande relation avec l'intensité de l'alimentation de la plante. Dans certains sols qui possèdent des solutions relativement riches (8 à 10 mg K par litre), la réaction aux engrais est marquée, alors qu'elle est très faible dans d'autres sols présentant des solutions beaucoup plus diluées. La nutrition potassique de la plante dépend plutôt de la « densité » des ions K^+ parmi les autres cations échangeables du sol.

Les lois régissant l'absorption du potassium dans le sol sont donc nettement différentes de celles qui ont été mises en évidence dans les solutions pures. Dans ce dernier cas, l'absorption du potassium est peu modifiée par la présence de quantités croissantes d'autres cations (Barbier, 113 ; Barbier et Coïc, 114). Il n'en est plus de même dans le sol, où la proportion du potassium parmi l'ensemble des cations échangeables est un facteur important de l'alimentation.

D'autre part, l'alimentation potassique dépend peu de l'énergie d'adsorption des ions K^+, et de leur mobilité. Or, la désorption des ions K^+ est extrêmement rapide, contrairement à celle des ions phosphoriques. Ce fait permet de comprendre quelques différences essentielles que l'on observe entre les alimentations phosphatée et potassique :

— La désorption des ions PO_4 étant très lente, leur mobilité, leur

vitesse de désorption, qui sont des fonctions indirectes de l'énergie d'adsorption, peuvent limiter étroitement l'absorption de la plante.

— Les ions K^+ se désorbent au contraire rapidement, et l'énergie d'adsorption devient un facteur secondaire.

Les ions K^+ se trouvent adsorbés parmi une masse beaucoup plus grande de cations de diverses espèces, et leur « densité » parmi l'ensemble des cations intervient fortement dans l'alimentation. Ce facteur de densité se pose beaucoup moin pour les ions PO_4 qui sont bien, semble-t-il, les principaux anions retenus par le complexe adsorbant du sol.

La faible intervention de la concentration en K de la solution du sol d'une part, l'importance beaucoup plus grande de la porportion des ions K^+ parmi les cations échangeables d'autre part, conduisent à penser que l'absorption du potassium s'effectue largement grâce à des phénomènes de contact racines-particules de sol.

b) Influence de la nature de l'argile.

Si les phénomènes de contact jouent un rôle important dans la nutrition potassique, on doit s'attendre à observer une influence marquée de la nature de l'argile, les propriétés des divers types étant assez différentes : capacité d'échange de cations, faculté de rétrogradation... etc. (137).

C'est effectivement ce que l'on observe (93, 138). Considérons, par exemple, deux sols très différents, ceux de Lieusaint et de Levet :

— Sol *de Lieusaint* (109). — Ce sol renferme 16,7 p. 100 d'argile, dont 80 p. 100 est de type mica ; les feuillets sont en voie d'ouverture. Les argiles micacées sont très riches en potassium, les ions K^+ se trouvant principalement logés entre les feuillets, à l'état non échangeable. Lorsque ces feuillets s'écartent, le potassium est libéré ; inversement, des ions K^+ apportés par les engrais peuvent rétrograder en pénétrant entre les feuillets, perdant leur caractère échangeable. Les argiles micacées présentent au maximum cette propriété de rétrogradation, surtout lorsqu'elles sont en voie d'ouverture.

Les parcelles K_0 de ce champ d'essais sont cultivées depuis 25 ans sans apports d'engrais potassiques. Les rendements n'ont cependant pas subi, depuis 1932, de baisse marquée. La teneur en K échangeable était au départ de 108 p. p. m. elle est actuellement de 83 p. p. m., soit une diminution de 35 p. p. m. Les exportations des récoltes sont de l'ordre de 100 Kg K par hectare et par an, ce qui représente, pour 4 000 tonnes de terre par hectare, 25 p. p. m. En 25 ans, les plantes ont donc exporté de ce sol environ 625 p. p. m. K, c'est-à-dire 25 fois plus que la diminution de K échangeable, sans que les rendements aient diminué notablement dans le temps. Ces rendements, sans être élevés, ne sont pas non plus

très bas (par hectare : 32 tonnes de betteraves de sucre, 15 tonnes de pommes de terre, 38,5 quintaux de blé, 7 tonnes de luzerne). Ainsi, les plantes ont puisé du sol quelque 600 p. p. m. de potassium apparemment non échangeable, qui ont assuré une alimentation insuffisante, mais malgré tout appréciable. L'argile a donc pu céder de grandes quantités d'ions K^+.

Ces argiles micacées en voie d'ouverture présentent à l'égard du potassium un « pouvoir tampon » considérable. Malgré 25 ans de traitements très différents, les teneurs en K échangeable ont relativement peu varié dans les différentes parcelles, et les concentrations des solutions du sols sont restées sensiblement identiques. La présence de feuillets micacés partiellement ouverts ne permet vraisemblablement pas une activité élevée des ions K^+ dans la solution du sol, les concentrations d'équilibre restent très faibles dans les trois parcelles. L'alimentation des plantes s'effectue cependant très bien dans lesparcelles K_1 et K_2, qui fournissent des rendements élevés.

Sol de Levet — A l'opposé de celui de Lieusaint, le sol de Levet ne renferme que très peu d'argiles micacées. La plus grande partie de la fraction minérale de diamètre inférieur à 2 μ est constituée par du quartz ; il ne s'agit donc pas à proprement parler d'argile. Ce minéral ne contient évidemment pas de potassium dans le réseau, et ne possède pas de propriétés de rétrogradation ; sa capacité d'échange de cations est faible.

Dans les parcelles K_0, cultivées depuis 10 ans sans apports d'engrais potassiques, les rendements diminuent au fur et à mesure de l'épuisement, quoique la teneur en K échangeable demeure assez importante (100 p. p. m. soit 0,81 mgr K par gramme d'argile). Dans les parcelles K_2, cette teneur atteint 186 p. p. m. ; l'enrichissement a donc été très rapide. Les concentrations de solutions du sol sont élevées : 8,8 mg/l K en K_0, 23 mg/l en K_2. Malgré ces facteurs apparemment très favorables à la nutrition potassique, les rendements en pommes de terre sont généralement peu élevés dans le sol de Levet, même en années météorologiques favorables. Il semble que le meilleur moyen d'augmenter les rendements dans ces sols pauvres en argiles proprement dites soit d'accroître la teneur en colloïdes humiques, au moyen de fumures organiques (93).

Ainsi, l'alimentation potassique, principal facteur limitant ici les rendements en pommes de terre, s'effectue moins bien dans le sol de Levet que dans celui de Lieusaint, quoique les concentrations des solutions du sol et les teneurs en K échangeable soient beaucoup plus élevées. Il semble bien que la nature de l'argile intervienne fortement dans les processus de l'absorption, qui s'effectuerait beaucoup mieux à partir des argiles micacées possédant de grandes surfaces adsorbantes et des capacités d'échange assez élevées, plutôt qu'à partir du quartz où surface et capacité d'adsorption sont faibles.

CONCLUSIONS

La teneur des sols en potassium échangeable, déterminée habituellement dans les laboratoires d'analyses pour estimer le niveau des réserves potassiques, ne rend pas suffisamment compte de l'aptitude des sols à assurer l'alimentation des cultures. On obtient une bien meilleure approximation en considérant plutôt la proportion de potassium parmi les autres cations échangeables (rapports K/T, K/S, ou, en première approximation, K/Ca). Autant que possible, ces données doivent être complétées par la détermination de la nature des argiles ; cette analyse est à la fois très délicate et très coûteuse, mais elle donne des indications particulièrement importantes. Elle peut permettre d'expliquer les différences de comportement de sols renfermant des argiles de nature différente. En outre, elle laisse prévoir, dans une large mesure, l'intensité des phénomènes de rétrogradation et de libération d'ions K^+ à partir du réseau.

La concentration en potassium de la solution du sol ne donne qu'une piètre indication de la disponibilité des réserves, et du pouvoir alimentaire du sol en potassium. Elle n'est certainement pas la seule source de potassium à partir de laquelle la plante puisse s'alimenter. Des phénomènes de contact racines-particules de sol paraissent intervenir largement dans la nutrition potassique, et se manifester différemment selon la nature des argiles.

III. — MODIFICATIONS APPORTÉES PAR UNE CULTURE A L'ÉTAT DES RÉSERVES DU SOL

Les réserves d'ions PO_4 et K^+ adsorbées par les colloïdes des sols possédant un bon niveau de fertilité sont bien supérieures aux besoins d'une culture. Dans de tels sols, on admet actuellement qu'il suffit, pour maintenir la fertilité, de compenser par des apports d'engrais les prélèvements d'éléments minéraux effectués par les récoltes. Il semblerait, à priori, que l'on puisse se contenter de réaliser globalement cette restitution, à des intervalles de quelques années, les exportations des récoltes étant faibles par rapport au stock d'éléments adsorbés. Des observations culturales ont cependant montré, d'une part que le potassium apporté par des fumures moyennes était plus efficace que le potassium préexistant dans le sol (141), et d'autre part qu'avec des apports massifs d'engrais potassiques on ne pouvait obtenir dans les sols pauvres des rendements aussi élevés que dans les sols initialement plus riches (139, 142). Il semble donc, et de multiples expériences culturales le confirment, qu'il faille d'abord constituer dans le sol une réserve suffisante d'ions K^+ adsorbés, puis restituer chaque année les éléments exportés par les récoltes.

On peut examiner dans les terres des 42 parcelles progressivement enrichies les répercussions qu'a entraînées sur la disponibilité des larges réserves restantes la culture effectuée en 1943, en étudiant le sol avant et après la culture.

1° Phosphore.

Les équilibres sols-solutions et les vitesses de dilution isotopique des ions PO_4 ont été mesurés dans les prélèvements de novembre 1942, 1943 et 1944. La culture et les apports d'engrais ont été intercalés comme suit :

début novembre 1942	prélèvement de terre
fin novembre 1942	apport d'engrais
mars-août 1943	culture d'orge
début novembre 1943	prélèvement de terre
fin novembre 1943	apport d'engrais
début novembre 1944	prélèvement de terre

Un apport d'engrais a été effectué entre le prélèvement de 1942 et le début de la culture. Aucun apport n'a été fait entre la culture et le prélèvement de 1943 ; un seul apport est intervenu entre la fin de cette culture et le prélèvement de 1944.

La vitesse de dilution isotopique est sensiblement la même dans les trois prélèvements de terre, on n'observe pas de diminution appréciable dans le sol de 1943. La concentration de la solution du sol est par contre notablement abaissée (rapport sol/solution = 1/4) :

novembre 1942 : 2,86 mg P/litre,
novembre 1943 : 2,59 mg P/litre,
novembre 1944 : 2,72 mg P/litre.

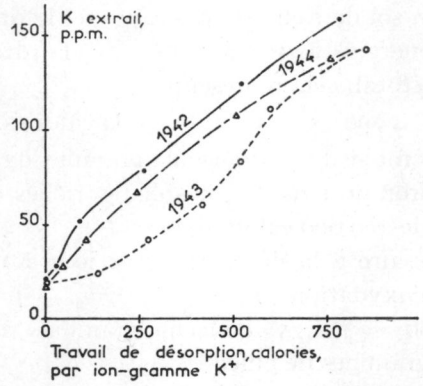
Bien que la quantité de P absorbés par les plantes n'excède pas 4 p. 100 du stock de P isotopiquement diluable (absorption d'environ 8 p. p. m. P, sur 210 isotopiquement diluables), la concentration de la solution du sol a diminué de 10 p. 100. Ce fait correspond bien à l'allure de la courbe de désorption. L'alimentation des plantes se traduit donc par une diminution sensible de l'activité des ions PO_4 restant dans le sol.

2° Potassium.

Les concentrations en K des solutions du sol sont sensiblement les mêmes dans les sols de 1942 et 1943. On ne peut d'ailleurs attacher à cette détermination une grande signification. Si l'on considère plutôt le travail de désorption (graphique 44), des différences très marquées apparaissent au contraire : les ions K^+ adsorbés avec de faibles énergies ont presque totalement disparu dans le sol de 1943, malgré l'apport d'engrais effectué peu avant la culture. Ces positions d'adsorption peu énergiques ne sont resaturées que dans le prélèvement de 1944, après l'épandage d'engrais qui a suivi la culture.

Les plantes se sont donc alimentées essentiellement aux dépens des ions K^+ faiblement adsorbés. Lorsque l'on fournit par ion-gramme 250 colories, 80 p. p. m. K sont libérées dans le sol de 1942, contre 40 dans celui de 1943 ; la différence, 40 p. p. m., correspond bien à l'ordre de grandeur des exportations de la récolte (120 à 160 kg K/hectare). Les ions K^+ restants, soit 125 p. p. m., ne se sont pas redistribués entre les divers niveaux énergétiques ; les fortes positions d'adsorption sont demeurées saturées, pendant que les plus faibles restaient vacantes (ou plutôt remplies par des ions Ca^{++}). Elles ne sont réoccupées par des ions K^+ qu'après l'épandage d'engrais de novembre 1943.

Durant l'enrichissement du sol, le potassium s'est réparti chaque année entre les divers niveaux d'énergie d'adsorption, selon une loi à peu près constante. Lorsque la culture est intervenue, les ions K^+ faiblement



GRAPHIQUE 44. — Travail de désorption en fonction des quantités de potassium extraites, avant et après une culture (1943).

liés ont été absorbés, mais non remplacés sur leurs positions par d'autres ions K^+. Au cours de l'enrichissement du sol, il se produit ainsi un phénomène irréversible : les ions K^+ d'activité élevée libérés par la dissolution des engrais sont adsorbés plus ou moins fortement, et, bien qu'en état d'agitation constante, ne peuvent saturer les liaisons faibles lorsque celles-ci ont été épuisées. Un apport d'ions d'activité supérieure, c'est-à-dire d'engrais, est alors nécessaire. Cela explique les observations culturales :

— Un apport annuel d'engrais, permettant la saturation des liaisons faibles épuisées par les récoltes, est plus efficace qu'un apport pluriannuel de la même quantité de potassium

— il est nécessaire de constituer peu à peu dans le sol des réserves suffisantes, afin qu'une quantité convenable d'ions K^+ puisse s'adsorber avec de faibles énergies.

Les phénomènes sont du même ordre pour le phosphore, quoique moins accusés.

IV. — ÉNERGÉTIQUE ET CINÉTIQUE DE L'ABSORPTION

1° Désorption des ions retenus par le sol.

Les ions minéraux sont adsorbés sur les colloïdes du sol avec diverses énergies, et, pour obtenir leur désorption, la plante doit fournir le travail correspondant à la rupture des liaisons. La source d'énergie dont elle dispose est l'oxydation respiratoire de substances organiques. On peut se demander dans quelle mesure ces oxydations nécessaires à l'extraction des éléments retenus par le sol représentent une perte notable de matière végétale, susceptible d'intervenir dans le rendement d'une culture.

Envisageons par exemple la nutrition potassique. Les récoltes absorbent annuellement environ 160 kg de potassium par hectare, soit 40 p. p. m. de sol. Cela représente sensiblement : $\frac{160\,000}{39} \# 4\,000$ ions-grammes K. Soit un sol de richesse moyenne, tel le prélèvement de 1936 de Versailles ; l'énergie à fournir est de l'ordre de 200 colories parion/gramme. Au total, cela représente :

$$4\,000 \times 200 = 800\,000 \text{ calories.}$$

L'oxydation aérobie d'une molécule-gramme de glucose aboutit à la formation d'environ 40 liaisons phosphates riches en énergie, c'est-à-dire à la libération de 460 000 calories (143).

L'énergie nécessaire à la désorption des ions K^+ retenus par le sol correspond ainsi à l'oxydation de :

800 000 /460 000 = 1,75 molécule-gramme de glucose, soit : $180 \times 1{,}75 = 315$ grammes de glucose.

Or, la quantité de matière végétale sèche produite dans un hectare par les cultures courantes est de l'ordre de 5 à 10 tonnes, soit 3 à 6 tonnes de glucides. L'oxydation de 315 g de glucose représente donc une perte absolument négligeable par rapport aux possibilités de la plante (moins de 1 /10 000 de son stock de glucides), et ne peut entraîner aucune diminution appréciable du rendement.

Lorsque l'on réalise un épuisement intense des sols, par exemple dans les essais de Neubauer sur les échantillons diversement enrichis en K, l'énergie d'adsorption ne limite certainement pas non plus en elle-même l'absorption. Les données énergétiques relatives à cette expérience sont indiquées dans le tableau suivant :

Année du prélèvement	Travail de désorption moyen cal/ion-gramme	Quantité de K absorbée, en ions-grammes	Dépense énergétique de désorption
1929	325	$0{,}04 \times 10^{-3}$	0,01 calories
1932	600	0,27	0,14
1936	500	0,37	0,19
1943	485	0,4	0,19
1955	515	0,7	0,36

La dépense énergétique relative à la désorption a été d'autant plus faible que les sols étaient plus pauvres. La récolte en matière sèche étant sensiblement la même dans les deux cas, les plantes cultivées dans le sol de 1929 disposaient de réserves énergétiques égales à celles du sol de 1955. L'absorption des ions K^+ échangeables n'a cependant pas été totale, elle a été plutôt limitée par la trop faible activité des ions restants. Cette dépense énergétique a été dans tous les cas infime, elle correspond au maximum (sol de 1955) à l'oxydation de 0,14 mg de glucose, soit encore à moins de 1/10 000 des glucides totaux des plantes.

On obtient des résultats comparables en effectuant les mêmes calculs pour la nutrition phosphatée. L'énergie nécessaire à la rupture des liaisons d'adsorption d'ions minéraux ne constitue donc certainement pas en tant que dépense énergétique un facteur limitant la nutrition minérale et la croissance. L'expérience montre cependant que cette donnée rend assez bien compte des possibilités alimentaires du sol. L'explication paraît être la suivante : le travail de désorption est une estimation inverse de la mobilité des ions :

— si $A\overline{G}'$ est faible, les ions sont très mobiles : grande vitesse de dilution isotopique ; éloignement des particules adsorbantes ;

— si $A\overline{G}'$ est grand, les ions sont au contraire peu mobiles autour de leurs positions d'adsorption ; ils se trouvent au voisinage immédiat des particules, leur dilution isotopique est lente.

Ce sont bien les ions les plus mobiles que la plante absorbe de préférence (graphiques 41 et 44). Ainsi, le travail nécessaire pour obtenir la désorption des ions retenus par le sol indique en fait une donnée d'ordre cinétique, une *vitesse* de désorption, qui est elle-même en relation étroite avec la nutrition minérale.

2° Gradient de concentrations solution du sol-suc cellulaire.

L'absorption des éléments minéraux à partir des solutions du sol ou de solutions nutritives synthétiques s'effectue contre un gradient de concentrations. Lorsque la plante s'alimente aux dépens de solutions diluées, comparables à celles du sol, les ions absorbés peuvent être cent fois plus concentrés dans la sève brute que dans le milieu extérieur (124). Le rapport des concentrations est encore plus élevé lorsque l'on envisage les cellules des feuilles d'une part, la solution nutritive d'autre part. Ainsi, dans les essais rapportés ci-dessus, la teneur en potassium de feuilles de blé était en moyenne de 10 p. 1 000 de matière verte, soit approximativement 10 g par litre de suc cellulaire, bien que l'absorption se soit effectuée à partir de solutions contenant 10 mg K par litre.

Le franchissement de ce gradient de concentrations nécessite, de la part de la plante, une dépense d'énergie, particulièrement au niveau des

racines. Celles-ci présentent d'ailleurs un métabolisme très actif (144). La source d'énergie dont elles disposent est l'oxydation des substances organiques, et notamment des glucides. Lorsque les racines sont privées d'oxygène, ou soumises à l'action d'inhibiteurs de la respiration et de la glycolyse (cyanures, fluorures, 2-4 dinitrophénol, oxyde de carbone), l'absorption est considérablement réduite, voire même arrêtée (6). La production d'énergie est donc indispensable à l'absorption.

De même que pour la désorption des ions retenus par le sol, on peut se demander quel est l'ordre de grandeur de cette dépense d'énergie. Si elle était importante, susceptible de limiter l'absorption, des faits agronomiques devraient être considérés attentivement : les concentrations en P des solutions du sol variant dans un rapport voisin de 1 à 100 (0,01 à 1 mg P par litre), les dépenses d'énergie varieraient également beaucoup.

Le calcul est en réalité assez difficile, car certaines données sont très mal connues. Le cas le plus simple est celui du potassium, que l'on trouve presque entièrement à l'état soluble dans les cellules. Le coefficient d'activité des ions K^+ y est cependant totalement inconnu. Afin d'évaluer au maximum toutes les données imprécises, on peut le supposer égal à l'unité. Le travail de concentration est alors :

$$\Delta G = RT \ln \frac{(K \text{ plante})}{(K \text{ solution})}$$

Le rapport des concentrations étant de l'ordre de 1 000 (10 mg/litre K dans les solutions du sol et 10 g/litre de suc cellulaire),

$$\Delta G \# 4\,000 \text{ calories par ion-gramme K absorbé}$$

Si l'on admet encore l'absorption de 4 000 ions-grammes K par hectare et par culture, la dépense d'énergie est de :

$$4\,000 \times 4\,000 = 16 \times 10^6 \text{ calories.}$$

Elle nécessite l'oxydation d'une quantité de glucose telle que :

$$\frac{16 \times 10^6}{4{,}6 \times 10^5} = 35 \text{ molécules-grammes,}$$

soit : $35 \times 0{,}18 = 6{,}3$ kg.

Cette quantité de glucose, quoique supérieure à celle qui serait nécessaire pour obtenir la désorption des ions retenus par le sol, reste très faible devant les possibilités de la plante : elle ne représente que 1/1 000 de la matière sèche produite, ou 1/500 du stock de glucides.

Il importe toutefois d'exminer quelle part revient à l'absorption dans les dépenses énergétiques totales de la plante, que l'on peut estimer à partir des mesures de respiration. D'après DEMOLON (145), ces dépenses sont extrêmement élevées, puisque un hectare de maïs pourrait perdre

par jour 175 kg de glucides. Les mesures effectuées par d'autres auteurs (146) conduisent à des résultats plus faibles, environ 30 à 50 kg de glucides par hectare et par jour. L'ordre de grandeur de ces données reste d'ailleurs comparable : les dépenses énergétiques totales de la plante, pour l'ensemble des synthèses, sont considérablement plus élevées que les dépenses nécessaires soit à la libération des ions adsorbés, soit au franchissement du gradient de concentrations. Les dépenses d'absorption envisagées ainsi ne représenteraient que 1/1 000 des dépenses totales. Elles seraient effectuées essentiellement par les racines, qui présentent des intensités respiratoires particulièrement élevées (5, 145).

En réalité, l'ensemble de la nutrition minérale exige certainement des apports d'énergie plus importants, car de nombreuses réactions interviennent entre les ions minéraux et les substances organiques : combinaison aux accepteurs... Il est d'ailleurs difficile de les distinguer de l'ensemble du métabolisme. Nous n'envisageons ici que les dépenses énergétiques occasionnées par les conditions particulières du sol : ions adsorbés par les colloïdes, et grande dilution des solutions du sol.

3° **Conclusions.**

Ni l'un, ni l'autre de ces deux facteurs ne limite donc la nutrition minérale pour des raisons directement énergétiques. Si l'alimentation des plantes leur est cependant étroitement liée, l'explication doit en être recherchées plutôt dans des raisons *cinétiques* :

— la mobilité des ions adsorbés est inversement fonction de l'énergie d'adsorption.

— La vitesse d'absorption est fonction de la densité et de la mobilité des ions dans le milieu, ainsi que de l'intensité du métabolisme végétal.

L'interprétation cinétique de l'absorption rend beaucoup mieux compte des phénomènes réels que son interprétation énergétique. Plutôt que la valeur absolue de la concentration de la solution du sol, la présence à proximité des racines de quantités suffisantes d'ions PO_4 ou K^+ très mobiles est importante. Dans les sols de faible pouvoir adsorbant (sols granitiques) une part importante des ions PO_4 se trouve dans la solution, au contraire, dans les sols tropicaux riches en hydroxydes métalliques, la quantité d'ions en solution est très faible, mais les réserves isotopiquement diluables rapidement sont élevées. Les végétaux s'alimentent bien dans les deux cas. Grâce sans doute aux phénomènes de contact particules-racines, qui apparaissent en comparant l'absorption dans les solutions pures et dans les sols, les plantes sont susceptibles de bien s'alimenter dans des sols possédant des solutions très diluées, si les réserves en ions de grande mobilité sont suffisantes.

Ces faits cinétiques s'expliquent probablement par des raisons indi-

rectement énergétiques : la vitesse des réactions chimiques dépend de l'énergie d'activation des corps réagissants (77, 147), qui peut être beaucoup plus élevée que le bilan de la réaction elle-même. La mesure des énergies d'activation de la désorption des ions minéraux permettrait sans doute de mieux comprendre les phénomènes de nutrition.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

L'absorption des ions minéraux dans le sol est nettement différente de l'absorption en solutions pures. La comparaison de cultures effectuées simultanément dans des solutions coulantes et dans les sols de Versailles diversement enrichis montre que, à concentrations égales des solutions coulantes et des solutions du sol, l'absorption dans le sol est plus rapide pour le phosphore, plus lente pour le potassium. Des phénomènes de contact racines-particules de sol se manifestent donc. L'excrétion d'ions H^+ et d'acides organiques est de nature à accroître notablement l'activité des ions PO_4 au voisinage des racines ; sur les ions K^+, l'effet est probablement bien moindre.

Dans l'épuisement de ces sols par des plantes jeunes, on retrouve l'influence des deux facteurs principaux de l'absorption : les besoins de la plante et la concentration du milieu. Les sols les plus riches ont été épuisés moins complètement, les plantes ayant absorbé plus d'éléments.

La nutrition phosphatée dépend à la fois de la concentration de la solution du sol, c'est-à-dire de l'activité des ions PO_4, et de la teneur du sol en ions PO_4 très mobiles, isotopiquement diluables en temps court. La disponibilité des réserves joue un rôle aussi important que la concentration de la solution du sol. Les plantes s'alimentent convenablement en phosphore dans des sols présentant des solutions extrêmement diluées, si les réserves d'ions PO_4 très mobiles sont suffisantes. Les plantes ne pourraient croître dans des solutions aussi pauvres en phosphore ; dans ces sols, l'alimentation s'effectue donc surtout grâce à des phénomènes de contact. Par contre, dans des sols sableux, de faible pouvoir adsorbant, la nutrition phosphatée se rapproche de celle que l'on observe en solutions pures ; les concentrations des solutions du sol atteignent 0,5 à 1 mg P par litre.

Même dans les sols de faible pouvoir adsorbant, le seul examen de la solution du sol ne suffit pas à apprécier le niveau phosphorique ; il faut également tenir compte des réserves faiblement adsorbées. Un indice tel que :

$$A = \begin{pmatrix} \text{p.p.m. P. isotopiquement} \\ \text{diluées en 15 mn} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{mg P par litre de solution} \\ \text{rapport sol/eau} = 1/4 \end{pmatrix}$$

rend le mieux compte des résultats culturaux. En appliquant cet indice

à des sols de types très divers, on constate qu'ils réagissent nettement aux engrais phosphatés lorsque A est inférieur à environ 6.

Plus encore que la nutrition phosphatée, la nutrition potassique semble à peu près indépendante de la concentration de la solution du sol. Elle ne dépend pas étroitement de la seule quantité d'ions K^+ adsorbés, mais plutôt de leur proportion parmi l'ensemble des ions de diverses espèces adsorbés par le complexe colloïdal du sol. Les diverses espèces végétales se comportent d'ailleurs très différemment : les céréales fournissent encore de bons rendements dans des sols très appauvris, et ne réagissent pas très fortement aux apports d'engrais. Les plantes sarclées, et notamment la pomme de terre, réagissent au contraire considérablement aux fumures potassiques. Ces différences peuvent s'expliquer par le développement et les propriétés variables des systèmes radiculaires des diverses espèces végétales (capacités d'échange des racines).

En outre, la nature des argiles joue un rôle important dans la nutrition potassique. Celle-ci s'effectue par exemple beaucoup mieux dans le sol de Lieusaint, riche en argiles micacées, que dans celui de Levet dont la fraction minérale la plus fine est surtout constituée par du quartz. Les solutions du sol sont pourtant beaucoup plus concentrées à Levet qu'à Lieusaint. L'étendue des surfaces adsorbantes et la capacité d'échange de cations paraissent intervenir fortement. La nature des argiles indique enfin les possibilités de régénération du potassium échangeable à partir des ions K^+ retenus entre les feuillets de certains types.

De façon générale, les plantes s'alimentent aux dépens des ions PO_4 et K^+ les moins fortement adsorbés, dont la mobilité est la plus grande. Il est nécessaire de restituer chaque année au sol les éléments exportés par les récoltes, afin de resaturer ces liaisons faibles, qui sont les plus utiles aux plantes.

La dépense énergétique qui serait nécessaire pour désorber les quantités d'ions correspondant aux besoins d'une récolte est extrêmement faible par rapport aux possibilités de la plante. Il en est de même de l'énergie nécessaire au franchissement du gradient de concentrations solution du sol-suc cellulaire. Ce ne sont donc pas ces dépenses énergétiques qui limitent en elles-mêmes la croissance. La concentration de la solution du sol et l'énergie d'adsorption représentent plutôt respectivement l'*activité* et la *mobilité* des ions minéraux ; elles déterminent la *vitesse* de l'absorption, et peuvent se compenser mutuellement en partie. Elles doivent être ensemble suffisamment élevées, afin que l'absorption permette le métabolisme le plus actif possible des plantes.

RÉSUMÉ

L'absorption des ions minéraux dans le sol est nettement différente de l'absorption en solutions pures. La comparaison de cultures effectuées simultanément dans des solutions coulantes et dans des sols diversement enrichis montre que, à concentrations égales des solutions coulantes et des solutions du sol, l'absorption dans le sol est plus rapide pour le phosphore, plus lente pour le potassium. Des phénomènes de contact (particules de sol-racines) se manifestent donc, et de façon différente pour les ions PO_4 et K^+. Dansl'épuisement de ces sols par des plantes jeunes, on retrouve l'influence des deux facteurs drincipaux de l'absorption : les besoins de la plante et la concentration du milieu. Dans les sols les plus riches, les plantes ont absorbé plus d'éléments, mais l'épuisement a été moins complet.

La nutrition phosphatée dépend à la fois de la concentration de la solution du sol, c'est-à-dire de l'activité des ions PO_4, et de la teneur des sols en ions très mobiles, isotopiquement diluables en temps court. Un indice tel que :

$$A = \begin{pmatrix} \text{P isotopiquement diluable} \\ \text{en} \\ \text{15 minutes (ppm de sol)} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{Concentration en} \\ \text{P de la solution} \\ \text{du sol, mg par l.} \end{pmatrix}$$

rend le mieux compte des résultats culturaux. En appliquant cet indice à des sols de régions tempérées de types très divers, on constate qu'ils réagissent nettement aux engrais phosphatés lorsque A est inférieur à environ 6. On obtient pour les sols tropicaux des résultats du même ordre, quoique les valeurs absolues des deux termes soient extrêmement différentes.

La nutrition potassique semble à peu près indépendante de la concentration de la solution du sol. Elle dépend plutôt de la proportion des ions K^+ parmi les autres ions adsorbés par le complexe celloïdal du sol. La nature des argiles joue, en outre, un rôle important dans la nutrition potassique ; l'étendue des surfaces adsorbantes et la capacité d'échange de cations interviennent notablement.

De façon générale, les plantes s'alimentent aux dépens des ions PO_4 et K^+ les moins fortement adsorbés, dont la mobilité est la plus grande. Il est nécessaire de restituer chaque année au sol les éléments enlevés par les récoltes, afin de resaturer ces liaisons faibles, qui sont les plus utiles aux plantes.

La dépense énergétique qui serait nécessaire pour désorber les quantités d'ions correspondant aux besoins d'une récolte est extrêmement faible par rapport à l'énergie produite par la respiration des plantes. Il en est de même de l'énergie nécessaire au franchissement du gradient de concentrations solution du sol-suc cellulaire.

Ce ne sont donc pas ces dépenses énergétiques qui limitent en elles-mêmes la croissance, et la nutrition minérale des plantes dans le sol doit être plutôt envisagée sous un angle cinétique.

Энергия адсорбции минеральных ионов коллоидами почвы и минеральное питание растений. (*Третья часть.*)

БЛЯНШЭ. (Версаль.)

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Поглощение минеральных элементов в почве ясно отличается от поглощения из чистых растворов. Сравнение культур сделанных одновременно в текущих растворах и в почвах, различным образом обогащенных, показывает, что, при одинаковых концентрациях текущих и почвенных растворов, поглощение фосфора происходит в почве быстрее и поглощение калия медленнее. Явления контакта (частицы почвы-корни), следовательно, имеют место, и притом проявляются неодинаково для ионов PO_4 и K. При истощении этих почв молодыми растениями, сказывается влияние двух главных факторов поглощения : потребность растения и концентрация среды. В наиболее богатых почвах, растения поглотили больше элементов, но истощение было менее полным.

Питание фосфором зависит одновременно от концентрации почвенного раствора, то-есть от активности ионов PO_4, и от содержания почв в очень подвижных ионах, могущих быть изотопически разведенными в короткий срок. Результаты культур могут быть наиболее хорошо представлены следующей формулой :

$$A = \left\{ \begin{array}{c} \text{P изотопически растворимый в 15 минут} \\ \text{(в миллионных долях почвы)} \end{array} \right\} \times \left\{ \begin{array}{c} \text{Концентрация почвенного раствора в фосфоре} \\ \text{(миллиграммы на литр)} \end{array} \right\}$$

Применяя эту формулу к почвам умеренных районов (= умеренного климата) различных типов, находят, что они ясно реагируют на фосфорные удобрения, когда A приблизительно ниже 6. Для тропических почв, получаются результаты такого же порядка, хотя абсолютные значения двух членов очень различны.

Калийное питание повидимому не зависит от концентрации почвенного раствора. Оно зависит скорее от пропорции ионов K между другими адсорбированными коллоидальным комплексом почвы ионами. Кроме того, природа глин играет важную роль в калийном питании; значительно вмешиваются обширность адсорбирующих поверхностей и обменная способность катионов.

Вообще, растения питаются засчет ионов PO_4 и K наименее крепко адсорбированных, имеющих наибольшую подвижность. Необходимо ежегодно возвращать почве элементы взятые урожаями, чтобы снова насытить эти слабые связи, наиболее полезные растениям.

Расход энергии необходимой для освобождения количеств ионов соответствующих нуждам одного урожая-чрезвычайно слаб по отношению к энергии произведенной дыханием растений. То же самое в смысле энергии необходимой для преодоления градиента «концентрация почвенного раствора-клеточный сок».

Следовательно, не эти расходы энергии ограничивают рост, и минеральное питание растений засчет почвы должно рассматриваться скорее с точки зрения кинетической.

SUMMARY

The energy of absorption of mineral ions by soil colloids, and mineral nutrition of plants (2 part).

The absorption of mineral ions in soil clearly differs from absorption in pure solutions. Comparison of cultures in percolating solutions and in variously enriched soils shows that at equal concentrations in the percolating solution and in the soil solution, absorption of phosphorus is more rapid and that of potassium is slower in the soil. Contact phenomena between soil particles and roots are here at play, differently affecting the PO_4 and K ions. The mineral removal from soil by young plants is governed by the plants' requirement and by the concentration of the nutrient medium. Plants growing in rich soils take up more nutrients, but exhaust the soil less.

The phosphorus nutrition depends on the concentration of the soil solution, that is on the activity of PO_4 ions, and on the content of mobile ions undergoing isotopical dilution within a short time in the soil. The index :

$$A = \begin{pmatrix} \text{P isotopically diluted} \\ \text{within} \\ \text{15 minutes} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{P concentration} \\ \text{of} \\ \text{the soil solution} \end{pmatrix}$$

gives the best expression of cultural results. By applying this index to various soil types of temperate regions, a value of A less than 6 indicates a marked response to phosphate fertilizers. Results of the same order are obtained on tropical soils, though the absolute values of the two terms are quite different.

The potassium nutrition appears to be more or less independent of the concentration of the soil solution, and rather depends on the proportion of K ions in relation to other ions adsorbed by the colloidal complex of the soil. The nature of the clays also plays an important role in the potassium nutrition of plants ; the size of adsorbing surfaces and ion-exchange capacity have marked effects.

Generally speaking, the plants are nourished at the expense of the less strongly adsorbed PO_4 and K ions, which possess a greater mobility. These useful elements of low fixation should be restituted annually to the soil in amounts corresponding to those removed by the crop.

The energy force required for the desorption of ions in amounts corresponding to the plant requirement is very small compared with the energy produced by plant respiration. The same holds true for the energy required for exceeding the gradient of solution concentration — cellular suction pressure. Thus, plant growth does not seem to be limited by these energy forces, and the mineral nutrition of plants should rather be considered from a kinetik point of view.

ZUSAMMENFASSUNG

Sorptionsenergie der mineral Ionen durch die Bodenkolloïden und mineral Ernährung der Pflanzen (3. Teil)

Die Sorption der mineral Ionen im Boden ist grundverschieden von der Sorption in reinen Lösungen. Der Vergleich von Kulturen die gleichzeitig in fliessenden Lösungen und auf verschiedenartig angereicherte Böden ge-

macht wurden, zeigt, dass, bei gleicher Konzentration der fliessenden Lösungen und der Bodenlösungen, die Sorption im Boden schneller ist für Phosphor, langsamer für Kalium. Kontaktvorgänge (Bodenteilchen-Wurzel) offenbachen sich und zwar auf verschiedener Weise für die PO_4-und K-Ionen. In der Verarmung dieser Böden durch junge Pflanzen, findet man wieder den Einfluss der zwei Hauptfaktoren der Adsorption : die Bedürfnisse der Pflanze und die Konzentration des Substrats. In den reichsten Böden haben die Pflanzen mehr Nährelemente aufgenommen, aber die Verarmung war weniger vollständig.

Die Phosphaternährung hängt sowohl von der Konzentration der Bodenlösung, d. h. von der Aktivität der PO_4-Ionen, als auch von den Gehalt des Bodens an leicht beweglichen Ionen also in kurzer Zeit isotopisch verdünnbaren Ionen ab. Ein Index wie :

$$A = \begin{pmatrix} \text{in 15 Minuten} \\ \text{isotopisch verdünnbarer P} \\ \text{(ppm von Boden)} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{P-Konzentration} \\ \text{der Bodenlösung} \\ \text{(mgr pro liter)} \end{pmatrix}$$

wiederspiegelt am Besten die Anbauergebnisse. Bei Anwendung dieses Indexes für verschiedene Böden der gemässigten Zone, stellt man fest, dass sie gegenüber Phosphatdüngung stark reagieren wenn A kleiner als ungefähr 6 ist. Bei Tropenböden erhält man ähnliche Ergebnisse, obwohl die absoluten Werte beider Glieder ausserordentlich verschieden sind.

Die Kaliernährung scheint unabhängig von der Konzentration der Bodenlösung zu sein. Sie hängt eher von dem Verhältniss der K^+ Ionen zu den anderen auf dem kolloïdalem Bodenkomplex sorbierten Ionen. Der Tontyp spielt auch eine wichtige Rolle in der Kaliernährung ; die Grösse der Sorptionsflächen und die Kationenaustauschkapazität sind sehr massgebend.

Allgemein gesehen, ernähren sich die Pflanzen mit den PO_4-und K^+-Ionen die am schwächsten sorbiert sind, also mit Ionen die eine grosse Beweglichkeit besitzen. Es ist notwendig jedes Jahr die Elemente, die durch die Ernten ausgeführt werden, dem Boden zurück zu bringen um diese der Pflanzen sehr nützlichen schwachen Bindungen wieder abzusättigen.

Die Energie, die notwendig wäre um die einer Ernte entsprechende Ionenmenge zu desorbieren, ist ausserordentlich gering gegenüber der durch die Atmung der Pflanzen gebildete Energie. Das selbe gilt für die Energie die notwendig ist um die Konzentrationsunterschiede der Bodenlösungen und des Zellsaftes zu überwinden.

Es sind also nicht diese Energieausgaben die das Pflanzenwachstum einschränken würden und deswegen muss die mineral Ernährung der Pflanzen im Boden eher von der kinetischen Seite betrachtet werden.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(6) ROBERTSON (R. N.). — Inorganic Plant Nutrients, Ann. Rev. of. Plant Physiol., 1951, 2, p. 1-24.

(77) WURMSER (R.). — Cinétique des réactions biochimiques, C. D. U., Paris, p. 1-30, 1949.

(93) FRANC DE FERRIÈRE (P. J. J.), CAMEZ (Th.) et MILLOT (G.). — Influence des types d'argile des sols et de la pluviosité sur la nutrition potassique de la pomme de terre. *Ann. INRA. Ann. Agro.*, 1, p. 51-72, 1958.

(108) BLANCHET (R.). — Taux d'acide phosphorique utilisable et valeur culturale de sols granitiques, *C. R. Ac. Agr.*, **41**, p. 745-751, 1955.

(109) FRANC DE FERRIÈRE (P. J. J.). — Les récoltes au champ de démonstration d'engrais potassiques de Lieusaint. Soc. Com. des Potasses d'Alsace. Mulhouse, p. 9, 1957.
(110) MILLER (E. C.). — Plant Physiology, Mc Graw Hill Book Company, New York, p. 225-227, 1938.
(111) CHOUARD (P.). — Cultures sans sol. Maison Rustique, Paris, p. 13-72, 1952.
(112) HEWITT (E. J.). — Sand and Water culture methods used in the study of plant nutrition. Commonwealth Agricultural Bureaux. Bucks (Angleterre), p. 86-87, 1952.
(113) BARBIER (G.). — Contribution à l'étude de la nutrition minérale de la plante en fonction de la composition chimique du milieu. *Ann. Agr.*, **4**, p. 568-586, 1936.
(114) BARBIER (G.) et COIC (Y.). — Contribution à l'étude du mécanisme de l'absorption des substances minérales par la plante. *C. R. Ac. Agri.*, p. 729-737, 1941.
(115) BARBIER (G.) et CHAMINADE (R.). — Contribution à l'étude quantitative de l'échange de cations dans les sols naturels minéraux. *Soil Research*, **1**, p. 1-9, 1934.
(116) BLANC AICARD (D.). — Communication personnelle de résultats non publiés.
(117) BLANCHET (R.). — Quelques aspects de l'absorption des éléments fertilisants et de leur utilisation à la croissance de la plante. *C. R.* VIe Congrès Int. Sc. Sol. Paris, Vol. D, p. 119-130, 1956.
(118) PRÉVOT (P.) et OLLAGNIER (M.). — Relations entre rendement, croissance et pourcentage des éléments minéraux, dans les tissus végétaux. Les niveaux critiques. *Bull. Soc. Fr. Phys. Vég.*, **3**, p. 47-52, 1955.
(119) Ensemble des travaux relatifs au diagnostic foliaire, de LAGATU (H.), MAUME (L.) et DULAC (J.). — Public. *C. R. Ac. Sc. C. R. Ac. Agri.*, *Ann. Agro.*, *Ann. Ec. Nat. Agric.*, Montpellier, 1924-1957, en particulier : MAUME (L.) et DULAC (J.). Observations sur la physiologie de la nutrition du blé, *Ann. Agr.*, **2**, p. 193-223, 1942.
(120) DEMOLON (A.). — La dynamique du sol, Dunod, Paris, p. 396-398, 1952.
(121) BURGEVIN (H.) et GUYON (G.). — Action des engrais phosphatés sur le développement de la plante et sur la répartition du phosphore chez l'orge de printemps. *Ann. Agr.*, **5**, p. 663-674, 1933.
(122) VESSEREAU (A.). — Méthodes statistiques en biologie et en agronomie. Baillière, Paris, p. 380, 1948.
(123) THOMAS (P.). — Manuel de Biochimie. Masson, Paris, p. 82-86, 1946.
(124) SCOTT RUSSEL and (R.) SHORROCKS (U. M.). — The effect of transpiration on the absorption of inorganic ions by intact plants. Conf. Int. Radioisotopes Rech. Scientif. Paris, en cours d'impression, 1957.
(125) JACOBSON (L.) and ORDIN (L.). — Organic acide metabolism and ion absorption in roots. *Plant Physiol.*, **29**, p. 70-75, 1954.
(126) CHAMINADE (R.) et BLANCHET (R.). — Mécanisme de l'action stimulante de l'humus sur la nutrition minérale des végétaux. *C. R. Ac. Sc.*, **237**, p. 1768-1770, 1953.
(127) CHAMINADE (R.). — Sur une méthode de dosage de l'humus dans les sols. *Ann. Agr.*, **2**, p. 119-123, 1946.
(128) POMOT (J.) et LECAT (P.). — Mise au point d'une méthode rapide de détermination de la valeur humique réelle des amendements organiques. Calcul et mesure de cette valeur. *C. R. Ac. Agr.*, **13**, p. 494-499, 1954. Applications à l'étude de quelques produits humiques. *C. R. Ac. Agr.*, **8**, p. 379-382, 1955.
(129) DARMOIS (E.). — Électrochimie, *loc. cit.* p. 400-405.
(130) DEMOLON (A.). — Croissance des végétaux cultivés. Dunod, Paris, p. 342-351, 1950.

(131) RUSSELL (R. S.), RUSSELL (E. W.) and MARAIS (P. G.). — Factors affecting the ability of plants to absorb phosphate from soils. I. The relationship between labile phosphate and absorption, *J. Soil Sc.*, **8**, p. 248-267, 1957.

(132) SCHOFIELD (R. K.). — Can a precise meaning be given to « available » soil phosphorus? *Soils and Fertil.*, **18,** p. 373-375, 1955.

(133) JENNY (H.). — Contact phenomena between adsorbants and their significance in plant nutrition, in Mineral nutrition of plants. Univ. Wisconsin, Press, p. 111-114, 1953.

(134) CHAUSSIDON (J.). — Communication personnelle de résultats non publiés.

(135) Essais d'engrais potassiques en grande culture. Soc. Com. des Potasses d'Alsace, Mulhouse, 1955, 1952.

(136) DEMOLON (A.). — Croissance des végétaux cultivés, Dunod, Paris, p. 241-244, 1950.

(137) FRANC DE FERRIÈRE (P. J. J.). — Argiles et cations. *Ann. Agr.*, **5,** p. 819-853, 1952.

(138) FRANC DE FERRIÈRE (J.), CAMEZ (T.) et MILLOT (G.). — Types d'argiles des sols, pluviosités et nutrition potassique de la pomme de terre et du blé. *C. R. Ac. Sc.*, **245,** p. 1561-1 563, 1957.

(139) BARBIER (G.), TENDILLE (C.) et TROCME (S.). — Expérience culturale de onze années sur la fumure potassique. *C. R. Ac. Agr.*, **43,** p. 256-261, 1957.

(140) BOISCHOT (P.) et SIMON (G.). — Sur la fixation de la fumure potassique. A paraître *C. R.* Congrès Chimie Industrielle 1957.

(141) CHAMINADE (R.). — Étude des équilibres entre le complexe absorbant et les solutions du sol. *Ann. Agr.*, p. 627-636 et 781-792, 1934.

(142) VAN DER PAAUW (F.). — Évaluation of méthods of soil testing by means of field experiments. *Intern. Soc. Soil Sc. Meeting*, Dublin, vol. I. p. 207-221, 1952.

(143) BALDWIN (E.). — Dynamic aspects of biochemistry. Cambridge Univ. Press, p. 452-455, 1952.

(144) KURSANOV (A. L.). — The root system as on organ of métabolism. Conf. Int. Radioisotopes Rech. Scientif. Paris, en cours d'impression, 1957.

(145) DEMOLON (A.). — Croissance des végétaux cultivés. Dunod, Paris, p. 20-22, 1950.

(146) MILLER (E. C.). — Plant Physiology. Mc Graw Hill Book, Comp. New York, p. 931-1017, 1938.

(147) EMSCHWILLER (G.). — Chimie Physique, *Presses Univ.* de France, Paris, t. III, p. 920-1 135, 1951.

(148) COMBES (R.). — La forme des végétaux et le milieu, A. Colin, Paris, p. 5-72, 1946.

(149) WILLIAMS (E. G.). — Influence of parent material and drainage conditions on soil phosphorus relationships, IIe Symposium Agrochimica, 1958, en cours d'impression.

(150) STRASMAN (A.), QUIDET (P.) et BLANCHET (R.). — Valeur comparée de divers tests analytiques relatifs au potassium du sol, d'après la réaction des plantes aux engrais potassiques, *C. R. Ac. Agr.*, **44,** p. 639-642, 1958.

633. 1 : 631. 427. 3

DIAGNOSTIC FOLIAIRE DES CÉRÉALES ET DÉTERMINATION RATIONNELLE DE LA FUMURE

PAR

L. GACHON

Station d'Agronomie, Centre de Recherches Agronomiques du Massif Central, Clermont-Ferrand.

PLAN DU MÉMOIRE

I. — Influence des conditions de profil sur la composition chimique de la feuille et sur le rendement en grain.
1. — Profondeur du sol.
2. — Substratum.
3. — Arrosages.
4. — Nappe phréatique.
5. — Profondeur de la nappe phréatique.
6. — Interactions — Influence de l'alimentation hydrique.
7. — Conclusions.

II. — Le diagnostic foliaire et la fertilisation azotée.

III. — Influence des matières organiques.

IV. — Influence de la variété.

V. — Interprétation des résultats obtenus en essais de fertilisation complète.
1. — Crouelle 1952.
2. — St-Amand-Roche-Savine 1953.
3. — Prétieux, chaninat 1954.
4. — Prétieux, chaninat 1957.
5. — Prétieux, chambon 1957.

VI. — Conclusions.

En lançant à peu près simultanément « le diagnostic foliaire » et « la triple analyse », LAGATU et MAUME d'une part, LUNDEGAARD d'autre part, considéraient que l'analyse minérale de la feuille était un excellent moyen de connaître la valeur nutritive d'un milieu cultivé et par là de déterminer rationnellement la fumure.

Pendant six années consécutives, la Station d'Agronomie de Clermont a pratiqué la méthode du diagnostic foliaire dans le but de contrôler les conséquences engendrées par divers facteurs du milieu sur l'alimentation minérale des céréales : les conditions de profil en cases de végétation, les engrais et amendements dans les champs de fertilisation, enfin les variétés.

La détermination des éléments majeurs, azote, acide phosphorique, potasse, chaux et magnésie, a été complétée par la mesure biométrique de la matière sèche de 100 feuilles.

I. — INFLUENCE DES CONDITIONS DE PROFIL SUR LA COMPOSITION CHIMIQUE DE LA FEUILLE ET SUR LE RENDEMENT EN GRAIN

Depuis 1952 la Station d'Agronomie de Clermont dispose de cases de végétation où les profils caractéristiques des sols de Limagne ont été reproduits (1). Le sol est une Terre Noire dont les caractères essentiels exprimés en pourcentages de terre fine sèche dont les suivants ; argile : 45, CO_3Ca : 7, matières organiques totales : 2. Pour chaque couple de cases, il possède une profondeur variable, repose sur un substratum poreux (gravillons) ou argileux (limons) ou bénéficie d'une nappe phréatique à niveau constant.

1° Profondeur du sol.

En comparant au tableau I d'une part les colonnes 1 et 2, d'autre part les colonnes 3 et 5 on constate que les taux de cendres, de P_2O_5 et de CaO sont peu influencés, que la matière sèche de 100 feuilles et le taux d'azote augmentent le plus souvent. La variation de ces deux derniers éléments s'explique aisément par une meilleure alimentation en eau et en azote lorsque le sol est plus épais, l'augmentation du tallage ne suffisant pas à maintenir le taux d'azote. La potasse diminue régulièrement sur le substratum graveleux et a plutôt tendance à s'élever sur le substratum limoneux.

Des singularités se relèvent surtout dans les résultats de 1953 où la sécheresse a sévi très tôt dans le courant de mai et très sévèrement ainsi qu'en témoignent le rendement en grain et le rapport paille/grain. Elles ne se manifestent pas systématiquement sur les deux substratum. C'est pourquoi elles seront examinées plus loin.

En définitive, en terre noire de Limagne chimiquement bien pourvue en éléments fertilisants, la profondeur du sol exerce peu d'effet sur l'ali-

(1) Pour les détails du dispositif expérimental, cf. *C. R. Acad. Agric.*, 1954, 40 134.

TABLEAU I

Cases de végétation — Mon Désir — Clermont-Ferrand.

Substratum : nature	Gravillons		Limon			Plan d'eau			
Substratum : niveau	0,85	1,45	0,30	0,60	1,00	0,30	0,60	1,20	1,80
N°s des colonnes :	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1953. — Blé d'hiver — Magdalena (Epiaison).									
M. S. de 100 feuilles (en g).	21,2	18,2	14,3		16,4	10,4	13,9	15,8	
P. 100 de M. S. Cendres ..	17,2	17,4	18,6		17,1	19,0	21,2	18,1	
P. 100 de M. S. N	4,09	4,06	3,32		4,00	2,45	2,81	3,71	
P. 100 de M. S. P_2O_5	0,87	0,67	0,61		0,65	0,88	0,78	0,63	
P. 100 de M. S. K_2O	5,78	5,27	4,71		5,04	3,89	4,41	4,95	
P. 100 de M. S. CaO	1,08	1,46	0,85		1,38	0,72	0,88	1,16	
P. 100 de M. S. MgO	0,45	0,44	0,35		0,50	0,20	0,24	0,33	
Rendement en qx/ha Grain	17,6	42,5	38,6	40,7	44,7	30,3	42,1	50,2	47,3
Rendement en qx/ha Paille	54,6	79,1	68,0	76,8	75,8	62,8	87,9	116,5	113,0
Rapport P/G	3,1	1,8	1,7	1,9	1,7	2,1	2,1	2,3	2,4
Tallage au m²	361	405	375	396	427	329	410	442	449
						arrosages			
1954. — Orge d'hiver — Probstdorf (Floraison).									
M. S. de 100 feuilles (en g).	8,7	10,1	6,9	7,4	7,1	10,1	8,1	9,4	10,4
P. 100 de M. S. Cendres ..	11,5	11,1	12,8	12,8	11,8	11,8	14,9	13,6	11,5
P. 100 de M. S. N	4,20	4,83	3,72	4,23	4,57	4,96	3,68	4,49	5,25
P. 100 de M. S. P_2O_5	0,75	0,75	0,75	0,76	0,78	0,75	0,73	0,75	0,77
P. 100 de M. S. K_2O	4,22	4,10	3,72	3,82	4,15	4,18	3,80	4,07	4,99
P. 100 de M. S. CaO	0,58	0,54	0,65	0,64	0,62	0,63	0,89	0,70	0,89
P. 100 de M. S. MgO	0,27	0,27	0,28	0,29	0,30	0,25	0,26	0,24	0,29
Rendement en qx/ha Grain	41,7	43,5	45,3	46,8	46,3	49,0	51,8	58,0	63,3
Rendement en qx/ha Paille	62,2	81,3	66,0	73,7	80,3	89,5	84,5	103,5	92,8
Rapport P/G	1,5	1,8	1,4	1,6	1,7	1,8	1,6	1,8	1,5
1956. — Orge de printemps — Rika sur Betteraves sucrières (Floraison).									
A. — *En absence d'Azote minéral.*									
M. S. de 100 feuilles (en g).	4,1	4,1	3,4	4,0	3,8	5,1	5,4	6,1	4,8
P. 100 de M. S. Cendres ..	16,0	16,7	16,0	16,0	15,9	17,1	19,4	17,0	15,5
P. 100 de M. S. N	2,62	2,99	2,62	2,80	2,71	3,18	2,54	3,77	3,42
P. 100 de M. S. P_2O_5	0,55	0,54	0,58	0,55	0,58	0,63	0,51	0,76	0,58
P. 100 de M. S. K_2O	2,94	2,73	2,78	2,75	2,80	3,09	2,58	3,22	3,01
P. 100 de M. S. CaO	1,46	1,41	1,25	1,42	1,29	1,47	1,40	1,68	1,18
P. 100 de M. S. MgO	0,20	0,15	0,19	0,13	0,11	0,16	0,22	0,22	0,12
Rendement en qx/ha Grain	49,2	51,8	44,9	48,2	48,5	61,5	56,4	62,6	68,6
Rendement en qx/ha Paille	53,4	55,8	45,1	54,3	54,0	73,6	68,6	92,4	94,0
Rapport P/G	1,1	1,1	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,5	1,4
Tallage au m²	695	741	604	655	708	762	741	885	957
B. — *Avec 60 kg/ha d'Azote minéral à l'automne.*									
M. S. de 100 feuilles (en g).		4,8	4,9	4,9	4,6	6,0	7,0	6,8	5,7
P. 100 de M. S. Cendres ..		14,6	16,8	16,3	15,9	15,4	18,8	17,9	15,3
P. 100 de M. S. N		3,98	3,28	3,24	3,55	3,86	2,83	3,88	3,66
P. 100 de M. S. P_2O_5		0,61	0,55	0,60	0,56	0,69	0,57	0,81	0,67
P. 100 de M. S. K_2O		3,22	2,94	3,48	2,84	3,50	2,98	3,44	3,40
P. 100 de M. S. CaO		1,35	1,44	1,45	1,21	1,62	1,48	1,59	1,43
P. 100 de M. S. MgO		0,18	0,23	0,21	0,15	0,19	0,17	0,31	0,19
Rendement en qx/ha Grain		49,2	55,6	59,6	53,7	75,4	68,8	72,0	76,6
Rendement en qx/ha Paille		78,4	69,4	77,9	71,3	102,2	121,2	138,0	113,5
Rapport P/G		1,6	1,2	1,3	1,3	1,3	1,7	1,9	1,5
Tallage au m²		1094	818	884	895	1070	965	1158	1182

mentation minérale de la feuille. Seul le taux d'azote croît avec l'épaisseur malgré l'augmentation correspondante du tallage. Mais il faut noter que l'accroissement des rendements est beaucoup plus proportionnel au nombre de tiges au mètre carré qu'à la teneur en azote de la feuille.

2° Substratum (Tableau I, colonnes 1 et 5).

Les variations systématiques concernent seulement la matière sèche de 100 feuilles, plus élevée sur gravillons que sur limons. Les cendres et l'azote demeurant sensiblement constantes, ce sont donc les hydrocarbones qui créent les écarts. L'interprétation de ce fait ne paraît pas devoir être recherchée dans une différence d'alimentation hydrique consécutive de la capacité globale de rétention du sous-sol puisque les variations sont à l'inverse de celles provoquées soit par l'épaississement du sol, soit comme nous le verrons aux prochains paragraphes, par la présence d'une nappe phréatique ou l'application d'arrosages. Il s'agirait là d'un effet direct du substratum limoneux.

3° Arrosages (Tableau I, colonnes 2 et 6 à partir de 1954).

Les arrosages ont été appliqués en 1954 à raison de 10 mm en début d'épiaison 3 jours seulement avant des pluies abondantes qui ont apporté 89 mm. En 1956, il ne s'agit pas d'arrosages proprement dits mais d'une arrière-action de fortes irrigations pratiquées tardivement sur la culture précédente (betteraves sucrières).

La présence d'eau complémentaire a augmenté sensiblement les rendements sans modifier l'alimentation de l'orge d'hiver mais par contre a provoqué en 1956 l'accroissement de la matière sèche et des taux de P_2O_5, K_2O et CaO. L'amélioration des disponibilités en eau s'est donc manifestée d'une façon positive en premier lieu sur le rendement en paille et en grain puis sur le développement de la feuille et partiellement sur son alimentation minérale.

4° Nappe phréatique (Tableau I, colonnes 2 et 8).

Les variations systématiques des éléments sont rares sur l'ensemble des 3 années étudiées, à un point tel qu'on peut se demander si les facteurs annuels, climat et surtout nature de la céréale, ne sont pas prépondérants. La nappe phréatique a simplement eu tendance à marquer davantage dans le même sens que les arrosages. Le cas est net pour l'orge de printemps dont presque tous les éléments contrôlés sont accrus, en présence comme en absence d'azote. En 1954, les écarts sont divergents.

Enfin, en 1953, l'ensemble des taux baissent vraisemblablement du fait de la concentration relative anormale du blé sur gravillons par suite de la sécheresse exceptionnelle de cette année.

5° Profondeur de la nappe prhéatique
(Tableau I, colonnes 7 à 9).

A partir de la profondeur moyenne (nappe à 1,20 m) on constate que l'élévation du plan d'eau aboutit systématiquement à un abaissement de toutes les mesures à l'exception des taux de cendres et P_2O_5 qui sont accrus. En présence de la nappe élevée, le développement végétatif est très important ; par ailleurs, la réduction du sol utile a limité les disponibilités minérales si bien que la résultante marque un effet global de dilution. Le plan d'eau à 0,30 m réalisé en 1953 confirme le sens de ces variations. La situation anormale de P_2O_5 pourrait s'expliquer par l'action des conditions d'anaérobiose sur la vitesse de solubilisation de l'acide phosphorique qui contribuerait à maintenir la solution du sol à son niveau critique d'équilibre.

L'action déficitaire la plus nette se manifeste sur l'azote. Il s'agit là incontestablement d'une carence azotée due à une mauvaise nitrification contrariée par la saturation permanente du profil. De tout le dispositif expérimental, ces cases présentent, pour toutes les cultures, le jaunissement le plus net. Les rendements baissent avec le déficit des bases et de l'azote mais il faut souligner aussi qu'ils suivent en celà le tallage.

En présence d'un plan d'eau profond, situé à 1,80 m les variations enregistrées ne sont pas systématiquement opposées aux précédentes. C'est le cas en particulier des résultats de 1956 sur orge de printemps qui marquent peut-être une action propre de la céréale de printemps. On constate en effet pour cette culture, un abaissement plutôt qu'un palier dans l'alimentation générale qui n'a cependant pas eu de répercussions défavorables sur les rendements, au contraire.

6° Interactions. Influence de l'alimentation hydrique.

L'examen de l'action séparée de chaque facteur du profil a mis en évidence leur interdépendance. Cela ne saurait surprendre car il n'est pas possible de dissocier l'effet de la profondeur du sol de celui des réserves hydriques et minérales qui en dépendent directement ; de même la nature du substratum contribue nécessairement à modifier les pertes par drainage soit encore les disponibilités en eau et en sels minéraux. En utilisant le même dispositif expérimental, D. COLLIER et M. ROBELIN ont mis en évidence l'interaction étroite de ces différents facteurs et leurs conséquences sur les rendements.

Compte tenu de la nature différente des espèces soumises au diagnostic foliaire, il apparaît que l'état hydrique du sol exerce des effets notables. En présence d'une humidité excessive, la croissance végétative est prépondérante sur l'absorption, d'où l'effet général de dilution observé sur les bases et sur l'azote ; il s'ensuit une chute parallèle des rendements en paille et en grain.

En présence d'un manque d'eau encore faible au début de la floraison mais qui s'accentue par la suite (1954 et 1956, cases sur gravillons), les différences d'alimentation minérale sont très faibles mais les arrosages pratiqués provoquent des écarts de rendements parfois considérables. Il faut remarquer que l'action de la sécheresse en fin de cycle végétatif se traduit par une augmentation du rapport paille/grain qui est donc un élément d'interprétation non négligeable.

En conditions particulièrement sèches et précoces (1953, cases sur gravillons) la croissance végétative est proportionnellement beaucoup plus ralentie que l'absorption minérale ; il en résulte dans la feuille une concentration de la plupart des éléments minéraux dont la migration vers l'épi est bloquée plus ou moins intensément et plus ou moins tôt. Dans ce cas extrême, il est curieux de constater que la chaux et la magnésie diminuent au lieu d'augmenter comme les autres éléments. Ces derniers faits sont confirmés par l'analyse de la récolte, où la concentration minérale est nettement amplifiée et comprend MgO mais où les variations de CaO se dissocient : sur substratum grossier ou limoneux, la sécheresse due à la réduction du sol provoque dans les deux couples de cases la concentration de CaO dans la paille et sa diminution dans le grain. Ce résultat laisse supposer que la chaux serait affectée plus intensément et, bloquée au bas des tiges, n'aurait atteint que faiblement les feuilles supérieures et surtout l'épi.

7° Conclusions.

En raison d'une part des effets exercés par les conditions pédoclimatiques sur l'alimentation de la feuille, et d'autre part des corrélations très étroites qui lient aux rendements l'eau consommée par la plante, il apparaît que l'analyse de la feuille ne peut suffire à estimer la capacité de production d'un milieu et surtout ne permet pas de définir avec certitude la formule de fumure la plus judicieuse.

On vient de voir que, sur un même sol, le diagnostic foliaire présente des variations parfois notables qu'il serait erroné d'attribuer exclusivement aux conditions chimiques et par conséquent de corriger par des apports d'engrais.

Dans des conditions moyennes de disponibilités hydriques, on a constaté que l'alimentation de la feuille augmente généralement avec la pro-

fondeur : ce fait peut être rattaché à la notion simple du « garde-manger » mieux approvisionné. Par ailleurs, les mêmes effets se produisent sous l'action de réserves en eau complémentaires qui peuvent donc être une cause indirecte. Finalement les rendements varient dans le même sens.

Il en va différemment dans les conditions extrêmes d'hydratation du milieu où l'on peut résumer ainsi, grosso modo :

— en milieu sec, la croissance est freinée vers la fin du cycle végétatif, d'où concentration des éléments minéraux dans la feuille qui coïncide avec l'inefficacité des engrais : c'est le domaine de la culture extensive ;

— en milieu fortement alimenté en eau, la croissance est plus favorisée que l'absorption d'où dilution coïncidant avec une grande efficacité de la fumure : c'est la domaine de la culture intensive.

Les observations présentées ne font que confirmer les travaux de MAUME et DULAC sur le « rôle important du milieu (climat et sol) dans l'absorption de N, P_2O_5 et K_2O par des blés ayant atteint une même époque physiologique » mais étendent ces conclusions à CaO et MgO et apportent une précision complémentaire sur la part qui revient à chacun des principaux facteurs du milieu.

II. — LE DIAGNOSTIC FOLIAIRE ET LA FERTILISATION AZOTÉE

Il est utile de rappeler que les composantes du rendement en grain des céréales sont :

— le nombre d'épis au m^2,

— le nombre de graine par épi,

— le poids de chaque grain,

ces trois composantes intervenant successivement mais en interdépendance.

Elles représentent les moyens dont dispose chaque plante pour adapter le taux protidique de chacun de ses organes aux fournitures d'azote offertes par le milieu cultural.

Or la distribution de l'azote est régie par plusieurs facteurs qui exercent ainsi, à tout instant, une action indirecte sur le rendement final obtenu.

a) **le système de culture** (assolement, restitutions organiques, plus particulièrement le précédent cultural) dont dépendent les sources d'azote du sol. Le précédent cultural intervient aussi par la date à laquelle cesse son alimentation azotée ;

b) **les caractères pédoclimatiques** qui définissent le milieu physique. Le climat conditionne la distribution de l'azote par la température qui règle la minéralisation et la nitrification et par la pluie favorisant l'absorp-

tion mais aussi le drainage. La capacité globale de rétention en eau du sol et la nature du substratum influencent précisément le drainage autrement dit les pertes.

c) **les engrais** modifient enfin ces disponibilités par leur dose, leur nature et leur date d'application. Leur utilisation rationnelle devrait compléter à tout instant le déficit éventuel de la fourniture par le sol, compte tenu de la capacité de production du milieu et des caractéristiques génétiques de la plante (aptitude au tallage, fertilité de l'épi).

Le nombre d'épis au m² est évidemment surtout fonction de la fourniture d'azote au tallage.

Le nombre de grains par épi dépend principalement de l'azote mis à la disposition de *chaque* tige au cours de la montaison et jusqu'à la floraison comprise. Au cours de cette phase végétative, la plante bénéficie partiellement de l'azote des feuilles inférieures qui se vident et de l'azote puisé dans le sol à cette époque.

Enfin l'alimentation azotée de chaque grain dépend du rapport de leur nombre, donc des deux précédents facteurs, à la fourniture provenant en partie du sol et en partie des feuilles supérieures qui se vident au bénéfice de l'épi.

Ces composantes, surtout les deux dernières, sont limitées par les exigences de la plante en lumière (risques d'étiolement) et en eau (risques de flétrissement). Il faut remarquer à ce sujet que la fourniture naturelle d'azote et la capacité globale de rétention en eau sont souvent liées, ce qui tend à créer une harmonie apparente.

Le diagnostic foliaire effectué en début de floraison sur les 2e et 3e feuilles sous l'épi, date et localisation considérées comme les plus favorables, traduit seulement la fourniture d'azote que reçoit chaque feuille analysée à ce moment-là. On conçoit que la concentration mesurée soit en corrélation avec la fertilité de l'épi (pour une variété donnée) et conditionne ultérieurement le poids du grain sous réserve d'une alimentation hydrique satisfaisante. Mais il n'en demeure pas moins que le facteur biométrique représenté par le nombre de feuilles ou la densité d'épis à l'ha, échappe pour une bonne part à son contrôle. Et cette composante du rendement n'est pas la moins importante.

En effet, dans la plupart des essais de fumure de la Station où a été réalisé le diagnostic foliaire, on constate que l'application d'azote au tallage provoque à la fois une augmentation du rendement et du taux d'azote de la feuille mais que celle-ci est nettement plus faible que celle-là, et qu'il n'existe pas une corrélation entre ces deux variables. En particulier, il est illusoire de penser qu'à un taux d'azote donné corresponde un rendement déterminé.

Les cases de végétation de la Station ont servi en 1956 à étudier le comportement d'une céréale en présence d'une fumure azotée de 60 k/ha

appliquée à l'automne avec l'intention de mesurer les interactions éventuelles entre l'azote et les dispositions de profil ; pour cela on a dû supprimer la double répétition des traitements. Le blé d'hiver primitivement semé ayant gelé en février, l'expérience a été terminée avec une orge de printemps Rika choisie pour sa résistance à la verse. Les résultats soumis à comparaison figurent au bas du tableau I, paragraphes A et B.

a) **Effets directs.** — L'azote appliqué a systématiquement accru la matière sèche de 100 feuilles et le taux d'azote foliaire qui traduisent le meilleur développement végétatif. Les autres éléments sont peu touchés, la potasse manifestant cependant une légère augmentation. A la récolte les rendements sont très améliorés, partout pour la paille mais non pour le grain.

b) **Interactions.** — La seule interaction notable dans l'analyse de la feuille provient du taux d'azote beaucoup moins augmenté en présence de la nappe phréatique, malgré une efficacité sur le tallage et le rendement aussi grande que dans les autres cases. Inversement la concentration de l'azote est forte sur gravillons avec un rendement en grain déprimé.

Les chutes observées dans le rendement en grain sont dues à des accidents : verse dans les cases à plan d'eau à 0,60 m et 1,20 m, manque d'eau final dans le sol sur gravillons. Ce dernier exemple confirme le danger d'appliquer une fumure azotée excessive dans un milieu où les réserves hydriques risquent de manquer en fin de végétation.

III. — INFLUENCE DES MATIERES ORGANIQUES

Les résultats enregistrés à Crouelle en terre noire de Limagne (1957) confirment les conclusions de LAGATU et MAUME et de CHAMINADE sur l'efficacité des matières organiques pour favoriser l'absorption minérale.

TABLEAU II

Crouelle A6. — 1957 — Cappelle sur maïs (Fin Floraison).

N = 20 k/Ha au semis F en arrière-action

Traitements :	T	N	NP	NPK	FNPK	FN
M. S. de 100 feuilles (en g)	12,3	12,9	13,6	12,6	13,2	14,4
P. 100 de M. S. Cendres	22,0	20,8	21,1	21,4	19,5	19,8
P. 100 de M. S. N	1,54	1,69	1,78	1,68	2,15	2,00
P. 100 de M. S. P_2O_5	0,55	0,54	0,52	0,55	0,57	0,60
P. 100 de M. S. K_2O	2,07	1,96	1,99	2,02	2,70	2,70
P. 100 de M. S. CaO	0,72	0,76	0,73	0,75	1,00	0,95
P. 100 de M. S. MgO	0,21	0,19	0,21	0,19	0,22	0,23
Rendement en Qx/Ha Grain	25,8	31,6	33,7	31,2	44,6	43,4
Rendement en Qx/Ha Paille	58,0	71,8	80,6	78,0	108,4	104,0
Rapport P/G	2,2	2,3	2,4	2,5	2,4	2,4
Tallage au m²	276	340		308		

En arrière-action, le fumier en présence d'une fumure complète quoique insuffisante en azote, a accru notablement le taux d'azote et surtout de K_2O et CaO. Le fait est d'autant plus remarquable que les Terres Noires de Limagne sont particulièrement riches en potasse assimilable et que leur complexe est saturé en calcium, aucune expérience n'ayant mis en évidence d'effet significatif de la potasse ou de la chaux dans ce milieu très argileux. Il s'agit là probablement d'une conséquence de l'amélioration biologique du sol par l'incorporation des matières organiques.

IV. — INFLUENCE DE LA VARIÉTÉ

Le diagnostic foliaire effectué en 1953 au domaine de Crouelle sur un essai de comportement de variétés montre quelques écarts dans la composition chimique de la feuille qui n'apparaissent pas tous en corrélation avec les rendements.

TABLEAU III

Crouelle — 1953 — Blés d'automne sur trèfle (Epiaison).

Variétés :	Cappelle Desprez	Abondance Lepeuple	Vilmorin 27	Vilmorin 23	Hybride de Bersée	Préparateur Étienne
M. S. de 100 feuilles (en g)	18,9	17,2	16,3	17,0	17,0	18,7
P. 100 de M. S. Cendres	14,0	13,2	14,5	13,2	14,6	14,4
P. 100 de M. S. N	3,10	3,24	3,11	3,18	3,05	3,30
P. 100 de M. S. P_2O_5	0,61	0,60	0,57	0,59	0,66	0,56
P. 100 de M. S. K_2O	3,33	3,47	3,21	3,12	3,21	3,60
P. 100 de M. S. CaO	1,35	1,17	1,34	1,09	1,06	1,52
P. 100 de M. S. MgO	0,36	0,33	0,34	0,34	0,30	0,50
Rendement en Qx/Ha Grain	44	42	41	39	38	38
Rendement en Qx/Ha Paille	105,6	100,8	86,1	85,8	87,5	79,8
Rapport P/G	2,4	2,4	2,1	2,2	2,3	2,1

Variétés :	Renfort	Blé du Mesnil	Docteur Mazet	Magdalena	Blé des Dômes
M. S. de 100 feuilles (en g)	17,9	19,3	15,3	21,0	16,3
P. 100 de M. S. Cendres	16,2	14,7	14,1	15,5	13,4
P. 100 de M. S. N	3,75	3,40	3,95	3,38	3,58
P. 100 de M. S. P_2O_5	0,71	0,56	0,56	0,58	0,57
P. 100 de M. S. K_2O	4,13	3,11	4,21	3,24	3,48
P. 100 de M. S. CaO	1,06	1,59	1,41	1,63	1,51
P. 100 de M. S. MgO	0,35	0,68	0,40	0,41	0,44
Rendement en Qx/Ha Grain	35	33	32	31	27
Rendement en Qx/Ha Paille	73,5	69,3	70,4	68,2	56,7
Rapport P/G	2,1	2,1	2,2	2,2	2,1

Pour l'azote les taux les plus élevés correspondent en général aux rendements les plus bas. Pas de variations notables pour P_2O_5. Les teneurs en K_2O sont fortes pour 2 variétés : Docteur Mazet et Renfort ; blé du Mesnil présente un taux de Mgo singulier. La chaux varie dans de nettes

proportions, les taux les plus faibles se trouvant souvent chez les variétés à rendement moyen. Dans l'ensemble, les variations sont faibles et moins importantes que celles provoquées par les conditions de milieu, en accord avec les travaux de MAUME et DULAC.

Cet essai a subi la sécheresse qui a caractérisé l'année 1953 et qui a affecté surtout les variétés précoces où la concentration relative des éléments, tout au moin de l'azote, apparaît alors comme normale eu égard aux constatations antérieures.

V. — INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS OBTENUS EN ESSAIS DE FERTILISATION COMPLÈTE

A l'aide des conclusions formulées précédemment, il est possible d'interpréter plus aisément les résultats fournis par le diagnostic foliaire effectué sur céréales dans les expériences de fertilisation organisées ces dernières années par la Station d'Agronomie de Clermont.

1° *Crouelle* 1952. Terre noire de Limagne. Pluies de mars à juin inclus 160 mm environ.

TABLEAU IV

Blé d'hiver : Vilmorin 27, sur Betteraves sucrières (Floraison).

N = 50 K/Ha au semis, F en arrière-action.

	T	N	NP	NPK	N + Fumier	N + Résidus
M. S. de 100 feuilles (en g)	15,0	16,7	15,8	15,0	16,7	17,5
P. 100 de M. S. Cendres	18,8	16,9	16,8	17,7	17,1	16,0
P. 100 de M. S. N	1,75	2,12	2,00	2,06	2,25	2,39
P. 100 de M. S. P_2O_5	0,63	0,47	0,52	0,54	0,45	0,50
P. 100 de M. S. K_2O	2,10	2,33	2,7	2,8	2,8	2,5
P. 100 de M. S. CaO	0,42	0,56	0,58	0,55	0,60	0,51
P. 100 de M. S. MgO	0,08	0,13	0,14	0,15	0,14	0,14
Rendement en Qx/Ha Grain	23,3	35,7	34,8	33,3	39,3	40,8
Rendement en Qx/Ha Paille	51,7	85,9	83,3	82,5	93,1	94,6
Rapport P/G	2,2	2,4	2,4	2,5	2,4	2,3

Le taux d'azote de la feuille augmente moins que les rendements sous l'effet de l'azote appliqué au semis et de l'azote complémentaire libéré progressivement par les verts de betteraves ou le fumier. La teneur des bases faible dans le traitement témoin est relevée essentiellement par la seule fumure azotée. Ce fait peut être la conséquence d'une meilleure exploration du sol par un système radiculaire mieux développé.

	T	(N avec ou sans PK)	N (+ verts de betteraves	N (+ Fumier en arrière action)
	—	—	—	—
Taux d'azote....	100	120	140	130
Rendement grain.	100	130	175	170

La pluviométrie voisine de la normale semble avoir été suffisante pour satisfaire la végétation du blé jusqu'à la maturité.

2° *St-Amand-Roche-Savine* 1953. — Sol granitique moyennement

TABLEAU V

Blé des Dômes sur pommes de terre (Epiaison).

	N = 20 K/Ha au tallage, F et Ca en arrière-action				
	T	F	FN	FNK	F Purin
M. S. de 100 feuilles (en g)	9,2	9,5	10,9	9,0	9,5
P. 100 de M. S. Cendres	10,0	11,2	9,5	10,0	9,6
P. 100 de M. S. N	2,64	2,71	3,24	3,46	3,38
P. 100 de M. S. P_2O_5	0,95	1,05	0,79	1,00	1,05
P. 100 de M. S. K_2O	3,91	4,08	3,92	3,81	3,92
P. 100 de M. S. CaO	0,58	0,55	0,55	0,50	0,60
P. 100 de M. S. MgO	0,22	0,22	0,18	0,23	0,20
Rendement en Qx/Ha Grain	11,2	15,3	18,6	19,1	20,5
Rendement en Qx/Ha Paille	32,6	39,4	41,7	42,2	38,8
Rapport P/G	2,9	2,6	2,2	2,2	1,9

	FNP	FNPK	FNPKCa	NPKCa
M. S. de 100 feuilles (en g)	8,6	9,7	8,9	9,3
P. 100 de M. S. Cendres	9,7	9,6	9,3	9,4
P. 100 de M. S. N	3,14	2,90	2,97	2,95
P. 100 de M. S. P_2O_5	1,05	1,01	1,15	1,04
P. 100 de M. S. K_2O	3,88	3,82	3,52	3,62
P. 100 de M. S. CaO	0,49	0,49	0,50	0,59
P. 100 de M. S. MgO	0,23	0,20	0,23	0,26
Rendement en Qx/Ha Grain	20,9	0,3	20,7	21,4
Rendement en Qx/Ha Paille	49,2	28,8	47,9	46,2
Rapport P/G	2,3	31,9	2,3	2,2

profond (pH 5,6 ; argile 15,5 p. 100 ; M. O. T. 2,9 p. 100), altitude 800 m. Printemps très sec ; juin pluvieux.

Pas de corrélation azote — rendement dont la composante essentielle est le tallage nettement accru par le fumier et l'azote. Seul l'engrais minéral a marqué sur le taux d'azote de la feuille. La productivité est limitée par des disponibilités insuffisantes du sol en fin de végétation. L'apport de chaux dans les deux derniers traitements a contrarié l'absorption de la potasse et a favorisé la nitrification, cause du plus grand rendement en paille ; mais le grain n'a pas été augmenté corrélativement par suite d'une fourniture tardive insuffisante vraisemblablement.

3° *Prétieux chaninat* 1954. — Sol argileux et acide de la plaine du Forez (pH 5,8 ; argile 40 p. 100 ; M. O. T. 3,1 p. 100). Printemps humide.

TABLEAU VI

Orge d'hiver Probstdorff sur blé (Floraison).

N = 20 K/Ha au tallage.

	T	N	NK	PK	NP	NPK
M. S. de 100 feuilles (en g)	6,3	6,8	6,3	6,0	6,8	6,4
P. 100 de M. S. Cendres	10,9	11,1	11,6	11,7	11,8	12,5
P. 100 de M. S. N	2,96	3,49	3,45	3,09	3,37	3,30
P. 100 de M. S. P_2O_5	0,84	0,81	0,76	0,75	0,83	0,80
P. 100 de M. S. K_2O	3,22	3,56	3,45	3,90	3,27	3,80
P. 100 de M. S. CaO	0,53	0,61	0,54	0,51	0,67	0,70
P. 100 de M. S. MgO	0,27	0,30	0,19	0,20	0,31	0,23
Rendement en Qx/Ha Grain	32,3	37,8	39,0	31,5	41,2	38,7
Rendement en Qx/Ha Paille	53,0	75,7	84,3	78,3	77,5	80,0
Rapport P/G	1,6	2,0	2,2	2,5	1,9	2,1

Comme à Crouelle 1952, le rendement en grain augmente plus que le taux d'azote sous l'effet de la fumure azotée appliquée au tallage.

	T	N (avec) ou sans PK)
Taux d'azote	100	113
Rendement grain	100	120

L'association des engrais azotés et phosphatés augmente la teneur en P_2O_5, sans effet sur les rendements. Les engrais potassiques ralentissent l'absorption de la magnésie.

4° *Prétieux chaninat* 1957. — Pluviométrie printanière normale 120 mm et juin très pluvieux (170 mm).

TABLEAU VII

Vilmorin 27 sur maïs (fin floraison, sauf F pleine floraison).

N_1 = 40 K/Ha et N_2 = 80 K/Ha au tallage, F et Ca en arrière action.

	F	FN_1	FN_1P	FN_1PK	$FNPK_1Ca$	FN_2PK
M. S. de 100 feuilles (en g)	8,0	9,9	9,9	9,6	9,5	
P. 100 de M. S. Cendres	16,1	15,2	15,1	15,0	15,0	
P. 100 de M. S. N	1,71	1,95	1,87	1,85	1,90	
P. 100 de M. S. P_2O_5	0,61	0,64	0,64	0,62	0,62	
P. 100 de M. S. K_2O	2,36	2,25	2,44	2,26	2,20	
P. 100 de M. S. CaO	0,53	0,59	0,55	0,63	0,60	
P. 100 de M. S. MgO	0,20	0,21	0,21	0,22	0,20	
Rendement en Qx/Ha Grain	13,0	21,1	20,0	20,9	21,1	26,6
Rendement en Qx/Ha Paille	15,5	42,6	43,0	54,1	44,0	71,3
Rapport P/G	1,2	2,2	2,1	2,6	2,1	2,7
Tallage au m^2	321			508		644

Faibles rendements dus à une alimentation azotée nettement insuffisante même en présence de 40 unités au tallage. Sous l'effet de cet azote, la concentration de la feuille a faiblement augmenté alors que le tallage a crû de 60 p. 100 et que le rendement en paille a presque triplé. Le rendement en grain a augmenté de 60 p. 100, ce qui est faible par rapport à la paille. C'est la conséquence d'une alimentation azotée devenue déficiente en fin de cycle dans les parcelles à azote, alors qu'elle était relativement faible dès le début de montaison dans les témoins. Compte tenu

des conditions climatiques favorables cette année, des épandages semi tardifs auraient probablement exercé des effets positifs sur le grain.

En définitive, il y a eu sensiblement le même poids de grain par épi dans toutes les parcelles, les épis étant plus petits mais mieux garnis dans les témoins.

5° *Prétieux chambon* 1957. — Sol sablonneux, léger, formé aux dépens d'alluvions récentes (pH 5,8 ; argile 17 p. 100 ; M. O. T. 2 p. 100). Printemps humide (voir ci-dessus).

TABLEAU VIII

Orge Rika sur betteraves (fin floraison).

N_1 = 40 K/Ha au tallage, Ca en arrière-action.

	T	N_1	N_1P	N_1PK	N_1PKCa
M. S. de 100 feuilles (en g)	6,0	6,2	7,7	7,4	7,9
P. 100 de M. S. Cendres	12,2	12,8	12,5	12,7	13,1
P. 100 de M. S. N	3,34	2,98	3,43	3,22	3,15
P. 100 de M. S. P_2O_5	0,54	0,51	0,59	0,55	0,60
P. 100 de M. S. K_2O	2,95	3,15	3,17	3,42	3,60
P. 100 de M. S. CaO	0,83	1,29	1,41	1,38	1,37
P. 100 de M. S. MgO	0,27	0,30	0,31	0,22	0,31
Rendement en Qx/Ha Grain	30,4	29,0	33,8	34,3	34,6
Rendement en Qx/Ha Paille	42,2	58,0	64,5	68,7	74,0
Rapport P/G	1,4	2,0	1,9	2,0	2,1
Tallage au m_2	610			922	

L'azote appliqué n'a pas modifié la concentration de la feuille mais s'est traduit par une augmentation de 50 p. 100 du tallage et dans les mêmes proportions de la paille. Le grain n'a pas suivi cette augmentation, mais ici c'est essentiellement la verse qui en est responsable. En effet, près de la moitié de la surface des parcelles ayant reçu les 40 unités d'azote a versé au cours du mois de juin surtout après la floraison.

On retrouve les effets des engrais potassiques sur la concentration en K_2O et de l'azote sur le taux de CaO, de même que l'antagonisme K_2O/MgO masqué en présence d'amendement calcaire.

De tous ces contrôles d'alimentation foliaire effectués par la méthode du diagnostic foliaire il n'est pas possible de déduire, pour l'avenir, dans chaque milieu et pour chaque céréale, quelle est la fertilisation azotée optimale à préconiser, ces exemples concrets ayant mis en évidence le rôle fondamental exercé par les conditions climatiques.

En ce qui concerne les engrais phosphopotassiques et les amendements calciques, aucune conclusion ne peut être tirée de ces résultats puisqu'aucun effet de ces engrais sur les rendements n'a été enregistré. Les quelques variations notées sur les taux de P_2O_5, K_2O, Ca ou MgO sont restées sans conséquence pour la production du grain.

VI. — CONCLUSIONS

Après une trentaine d'années d'études et d'applications, l'utilisation du diagnostic foliaire comme moyen de détermination de la fumure est devenue sujet de controverse. Des discussions engagées, on peut conclure que le diagnostic foliaire a rallié à peu près l'unanimité des agronomes en tant que moyen de détection des insuffisances alimentaires caractérisées, autrement dit des carences. Encore que, selon TROCME, l'analyse comparée de plantes déficientes et de plantes saines ne soit pas suffisante et qu'il soit indispensable d'y associer la contre-épreuve d'un traitement approprié pour aboutir à une certitude.

Par contre, la notion de niveau critique de même que les corrélations entre concentration minérale et rendement sont le plus souvent contestées. Divers auteurs, dont STEENBJERG, les ont fortement combattues, trop de facteurs, autres que les caractères chimiques du sol, intervenant dans la nutrition minérale.

A cet égard, le rapprochement de quelques chiffres des tableaux précédents montre combien il est dangereux de déterminer la valeur alimentaire d'un milieu ou les principes de son amélioration chimique par le seul diagnostic foliaire.

Par exemple, l'alimentation de l'orge de printemps est sensiblement identique en 1956 dans la case à sol profond sur gravillon en absence d'azote et dans la case à niveau d'eau élevé en présence d'azote (voir tableau I). Pourtant quand on passe de la première à la seconde le rendement fait plus que doubler pour la paille et augmente de 25 p. 100 pour le grain. Or dans le premier cas, l'application d'azote précoce qui aurait trouvé sa justification dans la teneur relativement basse de la feuille est absolument inefficace pour le grain alors que dans le second cas, un apport tardif supplémentaire aurait certainement accru notablement le poids de grain et aurait ramené le rapport paille/grain à un niveau normal.

En outre, le diagnostic foliaire représente, à un moment donné, le reflet de la livraison d'éléments minéraux que le milieu a mis à la disposition de la culture, *dans des conditions pédoclimatiques déterminées.* Lorsqu'il s'agit d'éléments bien retenus par le complexe du sol, le contrôle de l'alimentation de plante pratiqué durant plusieurs années est susceptible de déceler le sens des améliorations chimiques souhaitables quoique l'absorption de ces éléments soit parfois indirectement influencée par d'autres facteurs : matières organiques, azote et eau en particulier.

Au contraire, lorsqu'il s'agit d'éléments aussi fugaces que l'azote dont les disponibilités varient d'une année à l'autre, particulièrement dans les sols moyennement profonds, il est difficile de prévoir par des

résultats antérieurs quels seront les besoins de l'année suivante, les facteurs climatiques excerçant un rôle trop important.

En définitive, pour être correctement interprété, le diagnostic foliaire nécessite la connaissance préalable des caractéristiques physiques du milieu. Dès lors il devient, pour l'agronome, un instrument très utile pour pénétrer plus avant dans l'étude des mécanismes régissant les rapports du sol et de la plante.

RÉSUMÉ

Le diagnostic foliaire des céréales a été pratiqué pendant plusieurs années dans des cases de végétation différenciées par la disposition du profil pédologique, ainsi que dans divers champs d'essais de fumure.

Il résulte des analyses effectuées que la nature du substratum, la présence d'une nappe phréatique et d'une façon plus générale les facteurs physiques réglant le rythme des disponibilités en eau pour la plante exercent une influence parfois notable sur la composition chimique de la feuille, l'azote étant l'un des éléments les plus affectés. En particulier, des conditions pédoclimatiques opposées peuvent engendrer des compositions minérales voisines sur des cultures dont les réactions aux engrais chimiques sont absolument contraires.

En conséquence, si le diagnostic foliaire est un instrument d'analyse très utile pour mieux connaître les réactions de la plante à son environnement, son interprétation doit être établie en priorité en fonction des caractéristiques physiques du milieu.

SUMMARY

Foliar diagnosis on cereals, and rational determination of fertilizer requirements.

Foliar diagnoses on cereals were made during several years in pot experiments characterized by differences in the soil profile, and in variously fertilized field plots.

The analytical results showed that the nature of the substrate, the presence of a water-table, and generally all physical factors affecting the rhythm of water availability to the plant exert an often marked influence on the chemical composition of the leaves, especially in respect of nitrogen. Changing pedoclimatic conditions, in particular, may result in rather similar mineral composition in crops which show dissimilar responses to mineral fertilizers. Consequently, the interpretation of data of foliar analyses should be done by taking the physical characteristics of the habitat into account, if foliar diagnosis is to serve as any useful means for establishing the response of plants to their environment.

ZUSAMMENFASSUNG

Blattanalyse der Getreide und rationnelle Bestimmung der Düngung

Die Blattanalyse der Getreide wurde, während mehreren Jahren, in Vegetationskästen mit verschiedenem Bodenprofil und auch in verschiedenen Versuchsfeldern durchgeführt.

Aus den gemachten Analysen ergibt sich, dass die Eigenschaften des Substrats, das Vorhandensein von Grundwasser und allgemein die physikalischen Faktoren die den Wasserhaushalt bedingen, einen manchmal hervorragenden Einfluss auf die chemische Zusammensetzung des Blattes ausüben ; der Stickstoff ist eines der am stärksten beeinflussten Elemente. Entgegengesetzte pedoklimatische Bedingungen können ähnliche chemische Zusammensetzungen bewirken und zwar bei Kulturen die den Düngern in ganz entgegengesetzter Richtung reagieren.

Folglich, wenn die Blattanalyse ein sehr nützliches Instrument zur besseren Kenntniss der Reaktion der Pflanze gegenüber der Umwelt darstellt, muss die Erläuterung vorzüglich in Bezug zu den physikalischen Eigenschaften der Umwelt gemacht werden.

Листовая диагностика злаков и рациональное определение удобрения.

Л. ГАШОН. (Клермон-Ферран.)

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Листовая диагностика злаков производилась втечение многих лет в выращивательных цементных сосудах (cases de végétation), отличающихся исчезновением педологического профиля, равно как и в различных полях с опытами по удобрению.

Сделанные анализы позволяют заключить, что природа почвы, присутствие водяного уровня и, вообще, физических факторов, управляющих ритмом водоснабжения растений, имеют иногда значительное влияние на химический состав листа, причем азот является элементом наиболее сильно затронутым. В частности, противоположные климатические условия могут произвести сходные минеральные составы у культур, у которых реакции на химические удобрения совершенно противоположны.

Следовательно, если листовая диагностика и является аналитическим методом очень полезным, чтобы лучше знать реакции растения на его условия (жизни), объяснение должно делаться преимущественно в зависимости от физических условий среды.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CARLES (J.). — La physiologie normale du Blé. Analyse des plantes et problèmes des engrais minéraux. VIIe Congrès Intern. de Botan., Paris, 101, 1954.

CHAMINADE (R.). — Recherches sur le rôle de la matière organique dans la fertilité des sols. Influence de l'humus sur la nutrition minérale des végétaux. *Ann. Agron.*, **1**, 95, 1952.

COIC (Y.). — La nutrition et la fertilisation azotée du blé d'hiver. *Bull. Engrais*, fév, mars, avril 1953.

COLLIER (D.) et GACHON (L.). — Influence de différentes conditions de sous-sol de terres noires de Limagne sur l'alimentation minérale et le rendement :

— du blé d'hiver : *C. R. Acad. Agric.*, **40**, 134 et 138, 1954.

— de l'orge d'hiver : *C. R. Acad. Agric.* **41**, 263, 1955.

— de l'orge de printemps : *C. R. Acad. Agric.* **43**, 664, 1957.

COLLIER (D.) et ROBELIN (M.). — Contribution à l'étude de la dynamique de l'eau et des substances chimiques dans les sols argilo-calcaires de Limagne *Ann. Agron.* (à paraître).

DULAC (J.). — Le diagnostic foliaire des céréales. C. R. Acad. Agric., **41**, 328-331, 1955, et **42**, 112, 1956.

GOUNY (P.). — Composition minérale de la plante et rendement. Colloque analyse des plantes et Problèmes des fumures minérales. Paris, 87, 1956.

LAGATU (H.) et MAUME (L.). — Démonstration par le diagnostic foliaire de l'efficacité du fumier pour vaincre l'inhibition de la potasse. *C. R. Acad. Agric.*, **21**, 396, 1935.

LAGATU (H.) et MAUME (L,). — Détermination par la plante cultivée de la valeur nutritive d'un milieu cultural. *C. R. Acad. Sc.*, **216**, 753, 1943.

MAUME (L.). — Sur le contrôle biochimique de la nutrition des plantes cultivées *Bull. Techn. Inform.*, **81**, 487, 1953.

MAUME (L.) et DULAC (J.). — Rôle important du milieu (climat et sol) dans l'absorption de N, P_2O_5 et K_2O par des blés ayant atteint une même époque physiologique. *C. R. Acad. Agric.*, **21**, 120, 1935.

MAUME (L.) et DULAC (J.). — Nutrition comparée de blés de printemps et de blés d'automne. *C. R. Acad. Agric.*, **23**. 89, 1937.

MAUME (L.) et DULAC (J.). — Sur quelques principes de biochimie et leur application à l'estimation de la valeur alimentaire d'un milieu cultivé pour une plante donnée. *C. R. Acad. Sc.*, **231**, 915, 1950.

MAUME (L.) et DULAC (J.). — Contrôle biochimique de la nutrition du blé en divers milieux et sur diverses variétés. *C. R. Acad. Agric.*, **37**, 573, 1951.

STEENBJERG (F.). — Yield curves and chemical plant analysis. Plant and Soil, III, 97, 1951.

STEENBJERG (G.). — Manuring plant production and the chemical composition of the plant. *Plant and Soil*, V, 226, 1955.

TROCME (J.). — Quelques exemples de contribution de l'analyse des plantes au diagnostic des insuffisances de production des cultures. Analyses des plantes et problèmes des engrais minéraux. VIIIe Congrès Intern. de Botan. Paris, 111, 1954.

ULRICH (A.). — Plant analysis as diagnostic procedure. *Soil Sc.*, **55**, 102, 1943.

TABLEAU I

Hallencourt Dactyle Trifolium II	Dose N	Matière verte		Matière sèche			Azote				Cellulose % sec
		T/ha	Somme des coupes sur la même parcelle	% Vert	kg/ha	Somme des coupes sur la même parcelle	% Sec	% Vert	kg/ha	Somme des coupes sur la même parcelle	
30.4.58	0	3,4		22,9	780		3,17	0,72	24,7		16,45
1re Coupe	40 A	10,55		18,2	1 920		4,62	0,84	88,5		19,40
1er Prélèvement	40 N	8,45		17,9	1 510		4,75	0,85	71,8		17,30
1	80 A	9,70		18,8	1 825		4,38	0,82	80,0		18,50
	120 A	6,30		21,2	1 335		4,46	0,94	54,0		17,50
13.5.58	0	22,6		15,0	3 390		2,35	0,35	79,6		23,24
1re Coupe	40 A	37,08		12,52	4 640		3,91	0,49	181,5		24,32
2e Prélèvement	40 N	40,0		13,1	5 240		4,01	0,52	200,0		23,45
2	80 A	35,80		13,39	4 800		4,34	0,58	208,0		24,20
	120 A	32,20		14,3	4 600		4,24	0,60	195,0		21,62
13.5.58	0	13,7	17,1	15,85	2 170	2 950	2,96	0,47	64,3	89,0	21,10
2e Coupe	40 A	14,56	25,11	13,80	2 010	3 930	4,06	0,56	81,5	170,0	18,92
du prélèvement	40 N	17,37	25,82	13,0	2 260	3 770	3,87	0,50	87,4	159,2	22,36
du 30.4.58	80 A	15,21	24,91	13,9	2 115	3 940	4,68	0,65	99,0	179,0	21,00
11	120 A	18,44	24,7	12,45	2 290	3 625	4,47	0,55	102,5	156,0	20,70
17.6.58	0	16,0	19,4	27,2	4 350	5 130	2,44	0,664	106,0	130,7	30,10
2e Coupe	40 A	22,65	33,2	24,5	5 550	7 470	2,60	0,637	144,5	233,0	32,11
du prélèvement	40 N	18,0	26,45	23,9	4 300	5 810	2,66	0,636	114,5	186,3	27,70
du 30.4.58	80 A	21,9	31,6	24,1	5 280	7 105	2,76	0,665	146,0	226,0	26,93
21	120 A	20,5	26,8	20,5	4 430	5 765	2,62	0,566	116,0	170,0	
17.6.58	0	6,55	29,15	20,1	1 316	4 706	2,74	0,550	36,0	115,6	
2e Coupe	40 A	15,65	52,73	14,7	2 300	6 940	4,52	0,665	104,0	285,5	21,12
du prélèvement	40 N	14,15	54,15	16,7	2 365	7 605	4,23	0,706	100,0	310,0	18,33
du 13.5.58	80 A	19,00	54,80	15,6	2 980	7 780	4,23	0,660	125,0	333,0	19,56
12	120 A	21,00	53,20	16,2	3 400	8 000	4,23	0,686	144,0	339,0	23,28
17.6.58	0	4,40	21,50	22,0	968	3 918	2,76	0,607	27,0	116,0	23,00
3e Coupe	40 A	8,65	33,76	16,7	1 445	5 375	4,19	0,700	60,6	230,6	20,28
des prélèvements	40 N	9,35	35,17	17,5	1 635	5 405	4,32	0,754	70,4	229,6	19,77
du 30.4 et 13.5	80 A	11,65	36,56	16,4	1 910	5 850	4,33	0,710	82,7	261,7	20,60
111	120 A	13,40	38,14	17,7	2 370	5 995	4,27	0,756	101,5	258,0	21,03

Ainsi le n°21 désigne le 2e prélèvement effectué sur le 2er cycle de pousse après la première coupe du 1er cycle.

Les résultats, de rendements et des analyses faites sur les prélèvements, sont rassemblés dans les tableaux I et II.

TABLEAU II Hallencourt (Gorainoff)

Dactyle		U. F.				M. A. D.		
		100 kg sec	100 kg vert		UF./Ha.	g/kg sec	g/kg vert	g/U F.
1er Prélèvement 30.4.58 :								
1re Coupe	o	92	21		716	153	35	166
	40 A	87	15,8		1 670	240	43,7	276
1	40 N	90	16,1		1 360	245	43,8	272
	80 A	88	16,5		1 600	225	42,3	256
	120 A	90	19,0		1 200	230	48,7	256
2e Prélèvement 13.5.58 :								
1re Coupe	o	79	11,85		2 680	105	15,75	133
	40 A	77	9,65		3 580	197	24,7	256
2	40 N	78	10,20		4 080	203	26,6	260
	80 A	77	10,30		3 690	223	29,9	290
	120 A	83	11,90		3 820	217	31,0	261
3e Prélèvement 13.5.58 :								
2e Coupe du 30-4	o	84	13,3	2 536	1 820	141	22,3	168
	40 A	88	12,15	3 440	1 770	206	28,4	234
11	40 N	80	10,4	3 170	1 810	195	25,3	244
	80 A	84	11,7	3 380	1 780	242	33,6	288
	120 A	84	10,45	3 100	1 920	230	28,6	274
17/6 2e Coupe du 30.4 :								
	o	60	16,3	2 376	2 610	110	29,9	183
21	40 A	55	13,5	4 730	3 060	119	29,2	216
	40 N	67	16,0	4 240	2 880	123	29,4	183
	80 A	70	16,8	5 280	3 680	129	31,1	184
	120 A	—	—			121	—	—
17/6 2e Coupe du 13.5 :								
	o	—	—	—	—	128	25,7	—
12	40 A	84	12,35	5 510	1 930	233	34,2	277
	40 N	84	14,05	6 070	1 990	216	36,1	157
	80 A	87	13,60	6 270	2 580	216	33,7	248
	120 A	79	12,80	6 510	2 690	216	35,0	274
17/6 3e Coupe du 30.4 et du 13.5 :								
	o	78	17,15	3 280	754	129	28,4	165
111	40 A	85	14,2	4 670	1 230	214	35,7	252
	40 N	86	15,05	4 580	1 410	222	38,8	258
	80 A	85	13,95	5 005	1 625	222	36,4	261
	120 A	84,5	14,95	5 100	2 000	219	38,8	259

Les calculs des unités fourragères et des matières azotées digestibles ont été faits à Jouy-en-Josas d'après les chiffres d'analyses fournis par la Station d'Amiens.

a) RENDEMENT EN MATIÈRE VERTE.

Au cours du premier cycle l'influence de la fumure azotée ne se fait pas sentir au-delà de la dose de 40 unités /ha.

Bien que le 30 avril l'herbe —1— ait en moyenne une hauteur de 32 cm, la production est nettement trop faible si on la compare au 2e prélèvement du 13 juin —2— dont la production verte est de 3 à 5 fois plus élevée. Mais

le dactyle était alors au début de l'épiaison. A cette même date la repousse de la 1re coupe —11—, totalisée avec l'herbe précédemment récoltée —1—, ne compense pas la faiblesse de la 1re exploitation.

Au 17 juin l'exploitation 12 donne sensiblement la même chose que la 21, mais, la première coupe donnant plus en 2 qu'en 1, la somme de production 12 + 2 est très nettement supérieure à la somme 1 + 21. Le traitement 111, pour lequel l'influence des fumures azotées se manifeste alors seulement, additionné à 1 + 11, donne une production totale comprise entre 1 + 21 et 12 + 2.

b) Rendement en matière sèche.

Les traitements azotés se traduisent dans tous les prélèvements par une diminution du pourcentage de la matière sèche.

Les résultats, au point de vue rendements, ne changent cependant pas les conclusions faites sur la matière verte.

c) Teneur et exportation azotées.

Les teneurs reflètent l'influence de la fumure azotée par rapport au témoin sans azote. Mais il n'y a pas de différences significatives, dans l'ensemble des traitements, attribuables aux doses.

Donc, en ce qui concerne un des éléments mis en expérience, on ne peut dans cet exemple, trouver une accumulation nocive attribuable aux doses apportées. Nous retrouverons ce fait lorsque nous examinerons la richesse en matières azotées digestibles. Il faudrait plutôt en conclure que même la plus faible dose a fourni une herbe extrêmement riche en azote.

	1	2	11	1 + 11	21	1 + 21	12	2 + 12	111	1 + 11 + 111
0	25	80	64	89	106	131	36	116	27	116
40 A	88	181	81	169	144	232	104	285	61	230
Différence	63	101	17	80	38	101	68	169	34	114

Il faut toutefois signaler que dans le cas le plus favorable à la fumure azotée (2 + 12), l'augmentation de rendement est cependant substantielle (4 706 kg de matière sèche pour 0 et 8 000 kg de matière sèche à 120 unités d'azote de l'ammonitrate). Il y a là une certaine incompatibilité — que nous retrouverons — entre le maximun de production de matière sèche et la qualité de l'herbe.

Les exportations azotées continuent de refléter le comportement général de cette pâture déjà très riche. Il n'y a pas de différences fondamentales entre les doses d'azote fournies mais il y en a une très nette entre les parcelles fumées et non fumées. Pour l'ensemble des traitements es exportations sont doublées avec la fumure azotée.

Cet effet est très remarquable et nous le mettrons en relief en répétant les exportations suivant les exploitations des parcelles sans azote et des parcelles avec 40 unités ha apportées une seule fois sous forme d'ammonitrate.

Dans tous les cas une fumure de 40 unités a entraîné une consommation bien supérieure à la quantité apportée.

Cette action spécifique sur ce sol riche doit être particulièrement retenue car elle peut expliquer certains accidents consécutifs à des apports modérés d'azote.

d) UNITÉS FOURRAGÈRES.

Par suite de la diminution de la teneur en matière sèche qu'elles entraînent, les fumures azotées se traduisent par une production plus faible d'unités fourragères par 100 kg de vert.

C'est ainsi que si l'on note des différences de production à l'hectare pour les prélèvements 1 et 2, entre les parcelles témoins et les parcelles fumées, celles-ci deviennent beaucoup moins nettes dans les prélèvements 11 et 21. Par contre, dans 12 et 111 on voit l'influence des doses d'azote.

e) RAPPORT M. A. D./U. F.

Pour tous les échantillons ce rapport est très élevé. On pourrait même dire qu'il est trop fort déjà pour les témoins sans azote. Dès qu'il y a une fumure azotée ce rapport devient anormalement élevé, par suite du phénomène déjà noté qu'un apport même faible s'est traduit par une absorption beaucoup plus élevée d'azote.

***

Donc dans l'ensemble un essai de doses d'azote n'aurait pas dû être tenté sur ce sol capable par lui-même de subvenir aux besoins de la plante. La fumure azotée tout en fournissant des accroissements de production et, au total des coupes, d'unités fourragères, a donné des herbes trop riches en azote.

2. — A Fienvillers.

a) RENDEMENT EN MATIÈRE VERTE (tableau III).

Dans cette pâture resemée, fin 1956 sur une ancienne pâture retournée, l'influence des doses d'azote est beaucoup plus nette.

Au cours du premier cycle les doses croissantes donnent des tonnages croissants de matière verte. Ceci peut être attribué également à une

Tableau III

Fienvillers Dactyle Trifolium II	Dose N	Matière verte		Matière sèche			Azote				Cellulose % sec
		T/ha	Somme des coupes sur la même parcelle	% Vert	kg/ha	Somme des coupes sur la même parcelle	% sec	% vert	kg/ha	Somme des coupes sur la même parcelle	
	0	6,81		19,1	1 300		2,63	0,502	34,2		20,72
3.5.58	40 A	10,49		17,2	1 805		2,64	0,454	47,8		22,2
1re Coupe	80 A	15,62		16,78	2 620		4,41	0,740	115,5		20,43
1er Prélèvement	120 A	18,62		14,47	2 700		3,19	0,462	86,0		19,88
1											
	0	14,03		13,22	1 855		2,28	0,301	42,3		25,96
14.5.58	40 A	19,70		13,43	2 650		1,97	0,265	52,2		27,30
1re Coupe	80 A	27,10		12,41	3 370		2,60	0,323	87'6		20,55
2e Prélèvement	120 A	32,60		12,90	4 200		2,64	0,341	111,0		25,20
2											
	0	24,17		22,75	5 500		1,22	0,278	67,0		33,04
6.6.58	40 A	26,60		21,87	5 820		1,44	0,315	84,0		31.26
1re Coupe	80 A	29,50		22,87	6 740		1,50	0,343	101,0		30,10
3e Prélèvement	120 A	31,13		23,51	7 450		1,55	0,364	115,0		29,53
3											
6.6.58	0	10,47	17,28	22,10	2 320	3 620	1,94	0,428	45,0	79,2	27,70
2e Coupe	40 A	13,19	23,68	24,17	3 190	4 995	1,91	0,462	61,0	108,8	28,46
du prélèvement	80 A	12,50	28,12	17,39	2 170	4 790	2,42	0,421	52,0	167,1	24,76
du 3.5.58	120 A	12,36	30,98	18,94	2 350	5 050	2,62	0,499	61,6	147,9	22,00
11											
18.6.58	0	19,42	26,23	22,4	4 350	5 650	2,51	0,562	109,0	143,2	29,07
2e Coupe	40 A	13,09	23,58	24,5	3 200	5 005	2,48	0,608	79,5	127,3	28,12
du prélèvement	80 A	15,88	31,50	21,5	3 420	6 040	2,56	0,550	87,4	202,9	28,03
du 3.5.58	120 A	20,88	39,50	20,7	4 320	7 020	2,58	0,534	101,5	187,5	27,41
21											

précocité plus grande puisque au cours des 3 premières coupes les hauteurs moyennes étaient les suivantes :

Parcelle.....	0	40	80	120
Hauteur moyenne de l'herbe 3 mai.....	20 cm	27 cm	31 cm	33 cm
14 mai.....	35 cm	48 cm	56 cm	62 cm
6 juin	Début épiaison			

Cette influence de la fumure ne se manifeste plus au cours du deuxième cycle, alors que l'herbe n'a pas reçu d'apport complémentaire.

Au 18 juin, seule la fumure antérieure, à 120 unités d'azote produit autant que le témoin sans azote.

On peut penser que la première coupe, bien qu'effectuée sur des herbes atteignant 30 cm de hauteur était trop précoce et que la plante a été arrêtée à un moment où elle n'avait pu reconstituer des réserves pour la pousse suivante.

Il s'agit donc en fait de savoir quel cycle on doit favoriser en raison des besoins totaux de production pour l'entretien des animaux.

b) Rendement en matière sèche.

Le pourcentage de matière sèche est diminué sous l'influence de la fumure azotée dans les deux premiers prélèvements. Au 6 juin, au début de l'épiaison, les différences ne sont plus marquées.

Les différences de production ha dues au traitement sont nettes pour les deux coupes du premier cycle.

Celles du deuxième cycle ne sont plus évidentes.

c) Teneur et exportation azotées.

Contrairement au dactyle d'Hallencourt la richesse de l'herbe en azote suit à peu près les doses de fumure. On peut noter toutefois que la dose 40 ne se traduit pas par un enrichissement dans 4 cas sur 5. On se trouve alors dans les conditions que nous voulions mettre en évidence, à savoir que l'augmentation de production absorbait tout l'azote supplémentaire apporté par les engrais sans enrichir la plante, par suite de la dilution de la quantité absorbée dans une masse végétale, plus importante.

L'exportation en valeur obsolue correspond pour les 2e et 3e coupes du premier cycle aux doses d'azote apportées. Il s'ensuit que la fumure ne peut avoir une grande influence sur le deuxième cycle.

Ce champ apparaît donc comme un cas normal — le précédent étant un peu spécial. Il permet de voir l'effet direct d'un apport d'azote sur la

première coupe et montre en même temps la nécessité de recommencer l'apport puisque l'exportation a été à peu près proportionnelle à ce qui avait été fourni en début de végétation.

d) UNITÉS FOURRAGÈRES (tableau IV).

Le calcul des unités fourragères n'apporte pas de données supplémentaires par rapport aux observations sur la matière verte ou sèche.

En valeur obsolue, les chiffres sont comparables à ceux obtenus en

TABLEAU IV

Fienvillers (Vasse)

Dactyle		U. F.				M. A. D.		
		100 kg sec	100 kg vert	U. F./ha		g/kg sec	g/kg vert	g/U. F.
1er Prélèvement 3.5.58 :								
1re Coupe	0	84	16,05		1 090	121	23,1	144
1	40	81	13,90		1 460	122	21,0	155
	80	84	14,10		2 200	227	38,1	270
	120	85	12,30		2 290	154	22,3	181
2e Prélèvement 14.5.58 :								
1re Coupe	0	73	9,64		1 355	100	13,2	137
2	40	70	9,40		1 850	82	11,0	117
	80	84	10,40		2 820	119	14,8	141,5
	120	75	9,67		3 150	122	15,7	162,5
3e Prélèvement 6.6.58 :								
	0	51	11,60		2 800	37,5	8,53	73,5
3	40	58	12,70		3 370	32,5	7,11	56,0
	80	61	13,95		4 140	55,0	12,60	90,2
	120	62	14,60		4 550	45,0	10,6	72,6
6/6 2e Coupe du 3.5.58 :								
	0	68	15,0	2 660	1 570	80	17,7	117,5
11	40	64	15,5	3 500	2 040	78	18,8	122,0
	80	76	13,2	3 860	1 650	101	17,6	133,0
	120	82	15,5	4 200	1 910	141	26,7	172,0
18/6 2e Coupe du 3.5.58 :								
	0	63	14,0	3 830	2 740	114	25,5	181,0
21	40	66	16,2	3 580	2 120	113	27,7	171,0
	80	67	14,4	4 490	2 290	117	25,1	174,5
	120	68	14,1	5 230	2 940	118	24,4	173,5

premier cycle, à Hallencourt. Il semble donc que la production d'U. F. plafonne et l'on peut prendre comme production moyenne optimum un chiffre de 4 000 U. F. pour la première pousse.

e) RAPPORT MAD/U. F.

L'évolution de ce rapport en fonction de la fumure apportée et de la date de coupe est ici très intéressante.

Au 3 mai les fumures azotées donnent des herbes trop riches en matières azotées.

Au 14 mai les rapports deviennent convenables. Rappelons qu'ils s'appliquent à des herbes atteignant de 50 à 60 cm de hauteur.

Au 6 juin l'herbe devient pauvre en matières azotées.

Il y a donc, au point de vue équilibre nutritif, une période bien déterminée correspondant à une bonne alimentation.

Si l'on compare ces résultats à ceux d'Hallencourt on est cependant obligé de conclure que cette période ne peut être déterminée ni par l'âge ni par la hauteur des plantes (le prélèvement du 13 mai d'Hallencourt correspondant au début de l'épiaison).

Pour éviter tout accident de nutrition il serait donc intéressant de disposer d'un test rapide permettant une vérification pratique de cette qualité de l'herbe.

Un autre point montrant la nécessité de ce test peut être fourni par la comparaison des rapports M. A. D./U. F. des deux prélèvements du deuxième cycle. Dans ce cas les herbes se sont enrichies en vieillissant, par suite vraisemblablement d'une fourniture tardive d'azote par le sol. L'herbe jeune aurait eu alors un rapport plus convenable qu'une herbe plus âgée de 12 jours.

B — Lignières — Ray Grass d'Italie (Melle)

a) Rendement en matière verte.

Comme pour le dactyle de Fienvillers, l'influence de la fumure azotée est très nette. Il y avait également des différences marquées de hauteur d'herbes comme on peut le voir dans le tableau suivant :

Parcelle.....	0	50 Ammonitrate	50 Nitrate	100 Ammonitrate	150 Ammonitrate
Hauteur moyenne de l'herbe 22 Avril.....	17 cm	25 cm	22 cm	28 cm	28 cm
6 Mai.....	29 cm	44 cm	40 cm	48 cm	52 cm
20 Mai.....	Début épiaison				
4 Juin.....	Épiaison complète				

L'influence de la fumure azotée se manifeste encore très visiblement sur la récolte du deuxième cycle.

b) Rendement matière sèche.

Comme dans les échantillons précédents la fumure azotée se traduit par une teneur plus faible en matière sèche.

Les productions globales en matière sèche sont comparables à celles fournies par le dactyle mais ici les différences dues à l'azote sont encore plus sensibles.

TABLEAU V

Lignières en-Vimeu Ray grass Italie	Dose N	Matière verte		Matière sèche			Azote				Cellulose % sec
		T/ha	Somme des coupes sur la même parcelle	% Vert	kg/ha	Somme des coupes sur la même parcelle	% Sec	% Vert	kg/ha	Somme des coupes sur la même parcelle	
22.4.58	0	3,0		22,4	672		1,87	0,42	12,6		12,9
1re Coupe	50 A	9,2		17,7	1 630		2,79	0,49	45,5		14,9
1er Prélèvement	50 N	7,9		17,4	1 375		1,96	0,34	27,0		15,9
1	100 A	11,9		13,9	1 655		4,48	0,62	74,1		13,4
	150 A	13,3		14,1	1 875		5,22	0,735	98,0		13,3
6.5.58	0	5,27		17,43	918		1,76	0,306	16,2		18,2
1re Coupe	50 A	13,97		14,68	2 050		2,11	0,310	43,3		20,9
2e Prélèvement	30 N	11,20		14,31	1 600		1,60	0,229	25,6		22,0
2	100 A	18,78		13,31	2 500		2,17	0,289	54,2		21,6
	150 A	21,22		12,91	2 740		2,62	0,338	71,8		21,4
20.5.58	0	9,48		18,94	1 795		1,31	0,248	23,5		18,96
1re Coupe	50 A	20,03		18,80	3 770		1,39	0,261	52,3		19,34
3e Prélèvement	50 N	15,30		18,28	2 800		1,36	0,249	38,1		18,86
3	100 A	24,275		19,52	4 730		1,50	0,293	71,0		19,83
	150 A	25,825		14,30	3 700		2,53	0,362	93,5		20,73
4.6.58	0	12,2		21,0	2 560		0,99	0,210	25,5		24,60
1re Coupe	50 A	24,4		19,2	4 680		1,17	0,225	55,0		26,62
4e Prélèvement	50 N	18,15		22,2	4 030		1,13	0,251	45,5		25,02
4	100 A	34,2		18,3	6 260		1,35	0,247	84,4		25,10
	150 A	36,95		15,8	5 840		2,41	0,381	141,0		21,06
4.6.58	0	6,335	9,335	17,3	1 095	1 767	1,42	0,246	15,6	28,2	23,62
2e Coupe	50 A	10,550	19,75	17,7	1 870	3 500	1,43	0,253	26,8	72,3	22,22
du prélèvement	50 N	9,75	17,65	17,0	1 660	3 035	1,41	0,240	23,4	50,4	25,03
du 22.4.58	100 A	16,00	27,90	16,0	2 560	4 215	1,57	0,251	40,2	114,3	25,02
11	150 A	23,25	36,55	15,4	3 580	5 455	2,55	0,393	91,4	189,4	25,40

c) Teneur et exportation azotées.

Il faut noter la richesse moindre des herbes ayant reçu 50 unités d'azote sous forme nitrique par rapport à la forme ammonitrate. Les chiffres obtenus avec le nitrate donnant des teneurs très voisines ou même inférieures aux témoins sans azote.

L'exportation lors de la quatrième coupe se rapproche des quantités fournies par l'engrais.

Tableau VI

Lignières-en-Vimeu (Menu)

Ray Grass d'Italie		U. F.				M. A. D.		
		100 kg sec	100 kg vert	U. F./ha		g/kg sec	g/kg vert	g/U. F.
1er Prélèvement 22.4.58 :								
1re Coupe	0	96	21,5	645		77	17,5	80
	50 A	94	16,65	1 530		131	23,2	139,5
1	50 N	93	16,20	1 280		81,5	14,5	87,6
	100 A	95	13,20	1 570		231	32,1	243,0
	150 A	95	13,40	1 780		284	40,0	299,0
2e Prélèvement 6.5.58 :								
1re Coupe	0	89	15,50	817		70	12,2	78,7
	50 A	84	12,3	1 720		91	13,45	108,0
2	50 N	82	11,7	1 310		60	8,60	73,1
	100 A	83	11,05	2 075		94	12,50	113,0
	150 A	83	10,70	2 270		121	15,6	146,0
3e Prélèvement 20.5.58 :								
1re Coupe	0	88	16,70	1 580		43	8,15	48,8
	50 A	88	16,50	3 320		48	9,03	54,5
3	50 N	88	16,1	2 460		46	8,42	52,2
	100 A	86	16,80	4 060		55	10,7	64,0
	150 A	84	12,0	3 110		115	16,45	137,0
4e Prélèvement 4.6.58 :								
1re Coupe	0	77	16,20	1 970		22,5	4,73	29,2
	50 A	70	13,45	3 280		33,7	6,47	48,2
4	50 N	75	16,65	3 020		32	7,10	42,7
	100 A	76	13,90	4 760		45	8,23	59,2
	150 A	82	12,95	4,780		108	17,05	132,0
4/6 2e Coupe du 22.4.58 :								
	0	78	13,5	854	1 499	50	8,65	64,0
	50 A	81	14,35	1 515	3 045	51	9,03	63,0
11	50 N	76	12,90	1 260	2 540	49	8,33	64,5
	100 A	76	12,15	1 945	3 515	59	9,44	77,6
	150 A	74	11,40	2 650	4 430	117	18,00	158,0

d) Unités fourragères.

Les unités fourragères pour 100 kg secs sont peu variables avec les traitements azotés. Par contre, la matière sèche diminuant, ces traitements entraînent une baisse du nombre d'unités fourragères aux 100 kg verts. A ce moment on ne peut noter aucun avantage — au cours du premier cycle — de la fumure à 150 unités d'azote sur celle à 100, en ce qui concerne la production d'U. F. /ha. Il faut attendre la deuxième cycle.

e) Rapport M. A. D./U. F.

Pour ce ray grass d'Italie où l'on note une variation nette dans le rapport M. A. D./U. F. à la première coupe, on obtient dès le second prélèvement du 6 mai des rapports très convenables pour les animaux — avec une herbe de 40 à 50 cm. Au troisième prélèvement et à plus forte raison au quatrième, on a des rapports trop faibles, sauf pour la plus haute fumure.

La 1re coupe du deuxième cycle donne également des herbes trop pauvres en azote sauf avec 150 unités d'azote en début de végétation.

Il semble donc d'après ce résultat, qu'il y ait beaucoup moins de risques à fumer copieusement le ray grass d'Italie dont le rendement répond bien à l'apport, sans craindre, comme avec le dactyle, d'avoir des rapports M. A. D./U. F. beaucoup trop élevés. On pourrait même les croire nécessaires afin d'amener la richesse azotée à un taux convenable. Par contre pour une exploitation précoce une fumure de 50 unités suffit, à condition de la compléter par une fumure entre deux cycles.

III. — FORMES

Dans les essais précédents, la fumure azotée était fournie par l'ammonitrate et pour les doses plus faibles, de 40 unités sur le dactyle d'Hallencourt et de 50 unités sur le ray grass d'Italie, cette forme était mise en comparaison avec le nitrate de chaux.

En ce qui concerne le dactyle d'Hallencourt, les résultats dans l'ensemble, ne différencient pas les deux formes d'engrais azotés. Mais on a déjà vu que le sol était riche par lui-même et que l'azote fourni par la fumure n'avait en quelque sorte joué que par sa présence et non par sa quantité. Il est donc normal que les formes ne donnent pas de différences.

Pour le ray grass d'Italie, par contre, où nous avons observé une réponse réelle à la dose d'azote fourni, les fumures nitrique et mi-nitrique, mi-ammoniacale ont un comportement spécifique. Tout au long du premier cycle les rendements en vert et en sec fournis par la fumure nitrique sont nettement inférieurs à l'autre forme. Cette action est encore accusée par la teneur des herbes récoltées, l'azote de l'ammonitrate ayant donné, à doses égales, des végétaux significativement plus riches.

On peut également adjoindre à ces résultats, ceux de deux essais de formes sur Prairie naturelle.

Le premier réalisé à Marlers, mettant en comparaison la forme nitrique et la forme ammonitrate, à la dose 40 unités/ha d'azote.

Dans ce cas on ne peut noter encore que de très faibles différences attribuables à la forme.

Dans le second, réalisé par le Ceta de Songeons à St-Maur, la compa-

raison portait sur 5 formes fournissant toutes une dose de 40 unités d'azote. Le premier pâturage a été terminé le 22 avril. Les chiffres ci-dessous portent donc sur un deuxième cycle, la fumure ayant été apportée après le premier cycle.

	Matière verte/ha	Matière sèche		Azote	
		%	Kg/ha	% sec	Kg/ha
21 Mai					
0	13,850	16,7	2,310	1,70	39
40 Ammonitrate	15,800	15,7	2,480	2,36	58
40 Nitrate	15,800	14,4	2,280	2,71	62
13 Juin					
0	20,600	15,41	3,175	1,87	59
40 Ammonitrate	22,250	17,65	3,930	1,56	61
40 Nitrate	25,300	16,14	4,100	1,76	72

Donc O, sulfate d'ammoniaque, urée épandue sont à peu près équivalents en production verte, sèche et azote.

	Matière verte/ha	Matière sèche		Azote	
		%	kg/ha	% sec	kg/ha
31 Mai					
0	8,220	21,4	1,760	2,01	35
Sulfate d'ammoniaque	8,250	20,67	1,700	2,08	36
Urée épandue	9,600	16,80	1,600	2,01	32
Urée pulvérisée	11,250	16,47	1,850	2,32	43
Nitrate de chaux	12,000	19,34	2,320	2,05	47,5
Ammonitrate	13,250	18,00	2,380	2,22	53

Un deuxième groupe, donnant un rendement plus élevé, est constitué par urée en pulvérisation (plus faible en production de matière sèche) nitrate de chaux et ammonitrate. Pas de différence marquée entre ces deux formes.

	Matière verte/ha	Matière sèche		Azote	
		%	kg/ha	% sec	kg/ha
Au 14 juin					
0	11,950	21,4	2,560	1,60	42
Sulfate d'ammoniaque	13,000	22,8	2,960	1,37	40,5
Urée épandue	12,500	23,0	2,875	1,39	40,0
Urée pulvérisée	15,650	22,4	3,500	1,44	50,0
Nitrate de chaux	15,500	21,0	3,250	1,67	54
Ammonitrate	14,500	23,0	3,335	1,51	50

Là encore les trois formes, urée pulvérisée, nitrate de chaux, ammonitrate, donnent une production supérieure — dépassant 3,2 T de matière sèche — et une exportation d'azote supérieure de 10 kg.

IV. — CONCLUSIONS

De l'ensemble de ces résultats, mettant en comparaison différentes sources d'azote, on peut conclure que pour les espèces étudiées, Dactyle, Ray grass d'Italie, prairie naturelle, l'ammonitrate est toujours au moins égal au nitrate de chaux qui ne présente donc pas, à ce point de vue, d'avantages particuliers.

Quant à la dose à fournir, on est obligé de constater que, comme ailleurs, la richesse du sol et son aptitude à libérer de l'azote minéral peuvent modifier complètement les conseils de fumure. Mais, peut-être plus qu'ailleurs, il est difficile de prévoir les réactions du sol et si l'on peut malgré tout envisager une fumure moyenne d'une quarantaine d'unités ha pour le premier cycle de végétation de l'herbe, il semblerait nécessaire d'avoir dans de nombreux cas, un test permettant de juger rapidement de sa richesse en matières azotées. Cela permettait d'éviter certains accidents et de mieux diriger la production par une fumure appropriée.

RÉSUMÉ

Les résultats obtenus indiquent l'influence prépondérante prise par le sol et l'espèce sur la réaction des herbes aux fumures azotées. Dans ces conditions, il ne semble pas que le stade de développement ou l'âge des végétaux permettent de prévoir leur richesse en azote. L'influence des formes a été également étudiée.

SUMMARY

Yield and composition of some grass species during the first cycle of their growth. The effect of nitrogen fertilizing in 1958.

Results show the major effects of the soil and species on the response of grassland crops to nitrogen fertilizing. Consequently, the stage of development and the age of plants are unlikely to serve for predicting the levels of their nitrogen concentration. The effects of the form of nitrogen have also been studied.

ZUSAMMENFASSUNG

Ertrag and Zusammensetzung einiger Grassarten während dem ersten Vegetationskreislauf. Einfluss der Stickstoffdüngung im Jahre 1958.

Die erhaltenen Ergebnisse zeigen den überwiegenden Einfluss des Bodens und der Grassart auf die Auswirkungen der Stickstoffdüngung. Unter diesen Bedingungen, scheintes nicht möglich zu sein den Stickstoffgehalt nach dem Entwicklungsstadium oder nach dem Alter der Pflanze vorzusehen. Der Einfluss der Stickstoffarten wurde ebenfalls untersucht.

Урожайность и состав некоторых видов трав втечение их первого растительного цикла. Влияние азотного удобрения в 1958 году.

Ж. ЛЕФЭВР и Ж. ХИРУ. (Амьен.)

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Полученные результаты показывают, что природа почвы и вид травы имеют главенствующее влияние на реакцию трав на азотные удобрения. В этих условиях, кажется, что стадия развития и возраст растений не позволяют предвидеть их богатство в азоте. Равным образом, изучено влияние разновидностей.

631. 423. 3 : 546. 18.

EMPLOI DE L'ACIDE ASCORBIQUE DANS LE DOSAGE COLORIMÉTRIQUE DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE ASSIMILABLE DES SOLS

PAR

C. JUSTE et J. DELMAS (1)

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches Agronomiques du Sud-Ouest,
Pont-de-la-Maye

I — Principe de la méthode.

La méthode est basée sur la réduction du complexe phosphomolybdique par l'acide ascorbique.

La coloration ainsi obtenue est stable durant au moins deux jours et permet d'apprécier des doses minima d'acide phosphorique de l'ordre de 0,2 - 0,4 γ de P_2O_5/cc.

L'utilisation de l'acide ascorbique comme réducteur du complexe phosphomolybdique permet donc, contrairement au chlorure stanneux qui donne des colorations peu stables, et à l'acide amino-naphtol-sulfonique qui donne des colorations stables mais peu sensibles, de colorimétrer dans des conditions de sensibilité et de reproductibilité très acceptables.

II — Technique.

A. — Réactifs.

a) réactif d'extraction : acide citrique 2 p. 100 ;

b) réactif sulfo-molybdique : dans 1 bécher de 1 litre, on ajoute :

80g de molybdate d'ammonium,

500 cc d'acide citrique à 2 p. 100.

Dans un autre bécher de 1 litre, on ajoute :

500 cc d'acide citrique à 2 p. 100,

300 cc de SO_4H_2 de d = 1, 83.

On laisse refroidir. On verse les 2 béchers dans un ballon de 2 litres. On complète à 2 litres et on homogénéise. On conserve le réactif après filtration dans un flacon coloré.

(1) Collaboration technique : Y. GARAUD.

c) Solution réductrice : se prépare le jour même de l'utilisation. C'est une solution d'acide ascorbique à 2,5 p. 100, le solvant employé étant de l'acide citrique 2 p. 100.

d) Solution-mère de la gamme étalon : 191 mg de phosphate monopotassique sont dissous dans 100 cc d'acide citrique 2 p. 100. La solution-mère contient donc 1 000 γ de P_2O_5/cc. Au moment de colorimétrer, on prépare une solution-fille à 100 γ/cc.

B. — **Extraction du P_2O_5 assimilable.**

La méthode d'extraction est celle de la méthode internationale de dosage du phosphore dit assimilable $\left(\text{rapport } \frac{\text{sol}}{\text{ac. citrique 2 p. 100}} = \frac{1}{5}\right)$.

C. — **Colorimétrie.**

La gamme et les essais seront préparés dans des fioles jaugées de 25 cc.

Les points de la gamme 10γ, 20γ, 30γ, 40γ, et 50γ/25 cc sont obtenus en plaçant dans les fioles de la gamme 0,1 – 0,2 – 0,3 – 0,4 – 0,5 cc de la solution-fille.

Dans chaque fiole, on ajoute :
1 cc de la solution d'extraction citrique ;
2,5 cc de réactif sulfo-molybdique ;
0,5 cc de la solution d'acide ascorbique ;
on complète à un peu moins de 25 cc à l'aide d'acide citrique 2 p. 100 ;
on porte au bain-marie bouillant durant 20 minutes ;
on laisse refroidir, on complète à 25 cc et l'on homogénéise ;
on colorimètre dans des cuves de 1 cm à 8 500 Å (cell. au Cesium).

III — Calculs.

Soit x γ la valeur trouvée,
la teneur en P_2O_5 °/₀₀ de terre sera donnée par la relation :

$$\mathbf{P_2O_5{}^0/_{00}} = \frac{x}{2} \times \frac{1}{100}$$

IV — Ions gênants.

La présence de l'ion citrique empêche les interférences dues aux ions gênants, comme Fe^{+++} et Si^{++++}.

V — Exemple de résultats obtenus.

A. — **Gamme étalon.**

Gamme	Déviations observées	
	Essai N° 1	Essai N° 2
0	0	1,5
10 γ	12	12,5
20 γ	24	24,5
30 γ	37,5	37,5
40 γ	50	50

B. — **Solution d'extraction à laquelle on a ajouté des doses croissantes de P_2O_5.**

Doses de PO_4H_2K ajoutées à une solution d'extraction citrique	Doses de PO_4H_2K retrouvées par dosage colorimétrique
—	—
10 γ	9,5 γ
5 γ	5 γ
5 γ	5 γ
5 γ	4 γ

C. — **Comparaison avec la méthode** LORENZ-SCHAEFFER **classique.**

P_2O_5 °/₀₀ — Méthode colorimétrique acide ascorbique	P_2O_5 °/₀₀ Méthode volumétrique Lorenz-Schaeffer	P_2O_5 °/₀₀ — Méthode colorimétrique acide ascorbique	P_2O_5 °/₀₀ — Méthode volumétrique Lorenz-Schaeffer
0,107	0,099	0,270	0,280
0,104	0,097	0,330	0,323
0,067	0,064	0,330	0,314
0,134	0,136	0,190	0,168
0,067	0,080	0,140	0,117
0,079	0,048	0,260	0,242
0,069	0,070	0,165	0,159
0,090	0,093	0,300	0,286
0,119	0,097	0,104	0,107
0,079	0,078	0,190	0,188
0,062	0,052	0,245	0,235
0,070	0,076	0,178	0,161
0,175	0,160	0,196	0,198
0,290	0,263		

INTERPRÉTATION STATISTIQUE

Calcul de la pente de la droite de régression.

Soit y = taux de $P_2O_5 \times 1\,000$, obtenus par colorimètrie (cf. V — C).
Soit x = taux de $P_2O_5 \times 1\,000$, obtenus par la méthode LORENZ-SCHAEFFER (V — C.)
Nous pouvons calculer :

$$\Sigma y^2 = 920\,438$$
$$\Sigma x^2 = 838\,819 \qquad n = 27$$

$$\text{Moyenne } y = \frac{\Sigma y}{n} = \bar{y} = 163{,}3 \qquad \text{Moyenne } x = \frac{\Sigma x}{n} = \bar{x} = 155{,}2$$

$$\frac{(\Sigma y)^2}{n} = 720\,300 \qquad \frac{(\Sigma x)^2}{n} = 650\,536$$

$$\Sigma xy = 877\,018 \qquad \frac{\Sigma x \cdot \Sigma y}{n} = 684\,530$$

Ceci permet de calculer :

$$\Sigma(x - \bar{x})^2 = \Sigma x^2 - \frac{(\Sigma x)^2}{n} = 188\,283$$

$$\Sigma(x - \bar{x})(y - \bar{y}) = \Sigma xy - \frac{\Sigma x \Sigma y}{n} = 877\,018 - 684\,530 = 192\,488.$$

L'équation de la droite de régression $(Y - \bar{y}) = b\,(X - \bar{x})$ donne pour b :

$$b = \frac{\Sigma(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\Sigma(x - \bar{x})^2} = \frac{192\,488}{188\,283} = \mathbf{1{,}0223}$$

Calcul de l'écart-type de la pente de la droite de régression.

Il nous faut maintenant déterminer l'écart-type sb de b et pour cela déterminer la variance de y :

$$\text{Variance de } y = Vy = \frac{\text{Total} - \text{régression}}{n - 2}$$

$$\text{Variance total} = \Sigma(y - \bar{y})^2 = \Sigma y^2 - \frac{(\Sigma y)^2}{n} = 920\,438 - 720\,300 = 200\,138$$

Variance régression : $b^2\Sigma(x - \bar{x})^2 = 196\,780$

$$\text{d'où } Vy = \frac{3\,358}{25} = 134.$$

$$\text{Variance de } b = Vb = \frac{Vy}{\Sigma(x - \bar{x})^2} = \frac{134}{188\,283} = 0{,}00071340.$$

écart-type $= S\bar{b} = \sqrt{Vb} = 0{,}0267$.

Pour 25 degrés de liberté et par une probabilité de 95 % nous aurons donc :

$$\boldsymbol{b = 1{,}02 \pm 0{,}0267 \times 2{,}06 = 1{,}02 \pm 0{,}055}$$

b a donc 95 p. 100 de chances de se trouver entre 0,965 et 1, 075. Autrement dit, le coefficient angulaire de la droite de régression peut être considéré comme égal à 1.

Calcul de l'ordonnée à l'origine de la droite de régression.

Equation de la droite $(Y - \bar{y}) = 1{,}022\,(X - \bar{x})$ (équation 1)
remplaçons $\bar{x}$ et $\bar{y}$ par leur valeur : $\bar{y} = 163{,}3 \quad \bar{x} = 155{,}5$
d'ou $Y = 1{,}022X + 4{,}6$ et $Y_o = 4{,}6$

Calcul de l'écart-type de l'ordonnée à l'origine de la droite de régression.

$y_o = \bar{y} - b\bar{x}$(équation 1 quand X = 0)

$$\text{Variance } y_o = \text{variance } \bar{y} + b \text{ variance } \bar{x} \quad V\bar{y} = V\frac{y}{n} = \frac{Vy}{n} = \frac{134}{27}.$$

$$V\bar{x} = V\frac{x}{n} = \frac{Vx}{n} = \frac{\Sigma(x - \bar{x})^2}{n(n - 1)} = \frac{188\,283}{27 \times 26}$$

$Vy_o = 273$ écart-type $s_{yo} = \sqrt{273} \# \mathbf{16}$

Pour 25 degrés de liberté et pour une probabilité de 95 %, nous aurons donc :

$y_o = 4{,}6 \pm 2{,}06 \times 16$
$y_o = 4{,}6 \pm 33$

dans ces conditions, y_0 peut varier entre — 28,4 et + 37,6 soit, en p. 1 000 de P_2O_5 entre — 0, 028 et + 0, 038 et, par conséquent, nous pouvons considérer que l'ordonnée à l'origine varie de part et d'autre de zéro dans un intervalle étroit.

En considérant donc que $b \neq 1$ et que $y_0 \neq 0$, nous obtenons :

$$y \neq x$$

VI — Intérêt de la méthode.

Le dosage volumétrique de P_2O_5 assimilable des sols par la méthode classique LORENZ-SCHAEFFER présente un certain nombre d'inconvénients qui rendent cette méthode peu pratique pour l'exécution rapide de grandes séries.

Un des inconvénients majeurs réside dans le lavage du précipité phosphomolybdique.

La méthode colorimétrique à l'acide ascorbique, supprimant les nombreuses opérations que nécessitent la formation puis le lavage du précipité est particulièrement intéressante dans le cas des sols riches en fer ferrique (par exemple : sols podzoliques des Landes), la présence de l'anion citrique empêchant l'interférence des ions ferriques et siliciques qui abondent dans les extraits citriques de ces sols.

546. 47 + 546. 56 + 546. 711 : 545.

RECHERCHES SUR DES MÉTHODES DE DOSAGE PRATIQUE DES OLIGOÉLÉMENTS, CUIVRE, ZINC, MANGANÈSE DANS LES PLANTES ET DANS LES SOLS EN VUE D'APPLICATIONS DE ROUTINE DANS LES LABORATOIRES AGRICOLES

Exemples tirés des champs expérimentaux d'oligoéléments du Cetal et des plantes prairiales du champ expérimental du Laboratoire des Plantes Fourragères de Rouen.

PAR

E. JOUIS et Mlle M-Th. LECACHEUX.
Station Agronomique, Rouen.

INTRODUCTION

Etant donné que l'analyse chimique est le seul moyen pratique de juger à distance les propriétés d'un sol ou l'action du sol et du climat sur une culture, il convient de continuer à rechercher des méthodes d'analyses à la fois faciles à mettre en œuvre et dont les résultats permettent d'interpréter au mieux les constatations faites aux champs.

Par suite de l'exploitation intensive des temps modernes, des phénomènes de carence en éléments mineurs, autrefois peu redoutés, ou peut-être mal connus en Haute-Normandie, risquent de devenir plus fréquents. Nous avons décidé de consacrer une partie des travaux de la Station Agronomique de Rouen à la mise au point de méthodes de dosages aussi pratiques que possible, et à l'établissement de quelques normes relatives à la Haute-Normandie.

Nous avons étudié depuis trois ans, des méthodes de dosage du bore dans les sols et dans les plantes, et nous en avons fait des applications à la betterave et au lin. Nous avons également prospecté des sols de forêts du Pays d'Ouche au point de vue teneur en cuivre.

Dans ce qui suit, nous examinerons surtout les méthodes de dosage du Zinc, et la possibilité de conjuguer le dosage du Zinc avec le dosage du Cuivre et le dosage du Manganèse.

ANALYSE DU CUIVRE, DU ZINC ET DU MANGANÈSE DANS LES PLANTES (LIN, BETTERAVES, PLANTES FOURRAGÈRES..., EXPÉRIMENTATION PRÉLIMINAIRE)

Préparation des échantillons.

Les échantillons sont séchés normalement dans une étuve à 100/105°, puis broyés, au besoin quantitativement dans un pot en acier inoxydable de broyeur à billes Dangoumeau.

Soulignons que la fibre de lin, très difficile à réduire en poudre dans un broyeur à marteaux, est remarquablement traitée dans le broyeur à billes. Nous avons séparé, dans le lin, les tiges, les capsules et les graines.

Minéralisation des échantillons.

Nous avons essayé comparativement une méthode de minéralisation par voie humide et une méthode par voie sèche.

Minéralisation par voie humide.

Nous pouvions choisir une méthode nitroperchlorique,préconisée par COPPENET (5) pour le dosage du Cuivre, par CHABANNES, TROCME, BARBIER (3) pour le dosage du Zinc. Mais la manipulation de l'acide perchlorique nécessite de grandes précautions.

De plus KAHANNES et BRARD (10) ont montré que le volume énorme de vapeurs émises entraîne une perte par volatilisation de certains minéraux, en particulier chrome et manganèse.

Or nous désirions doser le Zinc, le Cuivre et le Manganèse sur une même attaque.

Nous avons donc expérimenté la méthode acide sulfurique plus eau oxygénée concentrée.

Destruction de la matière organique par le mélange acide sulfurique-perhydrol.

0, 5 à 1 g de poudre de plante sont pesés sur un petit carré de cellophane

On enveloppe délicatement et on introduit dans un matras Kjeldahl de 100 ml. De cette façon aucune particule de poudre n'adhère au col ou aux parois du matras.

On verse 5 ml d'acide sulfurique concentré pur (pour toxicologie). On chauffe à l'ébullition, on laisse refroidir et on ajoute goutte à goutte 0, 5 ml d'eau oxygénée pure (Electro Prolabo).

On porte à l'ébullition quelques minutes, on laisse à nouveau refroidir, puis on introduit de l'eau oxygénée, et ainsi de suite jusqu'à ce que le liquide reste limpide pendant 10 minutes à l'ébullition.

L'attaque est assez rapide, environ 20 minutes.

Le dégagement de vapeurs est important, d'où risque de pertes comme dans l'attaque nitroperchlorique si on ne surveille pas.

Après refroidissement complet, on ajoute 10 ml d'eau déminéralisée. On transvase dans un ballon jaugé de 50 ml et on complète.

Une attaque à blanc est conduite parallèlement avec un carré de cellophane et tous les autres réactifs en quantités identiques à celles utilisées dans le dosage.

Cette méthode convient bien pour le dosage du Cuivre et du Manganèse, mais elle présente un inconvénient pour le dosage du Zinc.

Dans ce cas, en effet, il faut neutraliser complètement le liquide d'attaque, ce qui entraîne l'emploi d'une quantité relativement importante d'ammoniaque, qui peut apporter du Zinc.

D'autre part, l'acide sulfurique, même très pur, peut également fournir du Zinc, et surtout du Plomb, qui est extrait en même temps que le Zinc par la dithizone.

Il en résulte que l'essai à blanc peut donner un chiffre Zn et Pb voisin de la teneur en Zn de la prise d'essai, ce qui n'est pas recommandable.

Nous avons donc porté notre attention sur la minéralisation par la chaleur.

Minéralisation par calcination.

CHABANNES (3) et d'autres auteurs ont constaté des pertes importantes de Zinc au cours de la calcination.

Par exemple, un échantillon a fourni 20 γ par calcination et 25 γ par attaque nitroperchlorique, la colorimétrie, à la dithizone, étant faite visuellement.

Or, d'après les autres résultats cités, la perte de 5 γ entre attaque humide et calcination est du même ordre de grandeur ou inférieure à l'erreur admise en colorimétrie visuelle.

Par ailleurs, des quantités croissantes de chlorure de Zn ajoutées à l'échantillon ayant fourni 20 γ n'ont permis aux auteurs de retrouver que 32 ou 35 de Zn, quelle que soit la quantité ajoutée, alors que par l'attaque nitroperchlorique on peut doser le Zinc ajouté, tout au moins quand l'addition ne dépasse pas 40 γ.

Nous avons donc supposé, que dans le cas du Chlorure de Zinc ajouté avant calcination, celui-ci s'est volatilisé au cours du chauffage avant de pouvoir se fixer solidement sur la matière organique.

Certains sels de Zinc résistent bien à haute température. Par exemple, d'après Clément DUVAL (7) l'oxyde de Zinc provenant d'une précipitation par le carbonate d'ammoniaque, peut être calciné à 1 000°; le sulfate de Zinc fournit par décomposition un oxyde qui résiste à 950°, l'oxalate en abandonne un autre qui résiste jusqu'à 590°.

Nous avons donc calciné à 500°, après séchage, 1 ml d'une solution de chlorure contenant 50 γ de Zn, additionné de 1 ml d'oxalate d'Ammonium. Nous avons obtenu un oxyde de Zn (jaune à chaud) qui après dissolution dans l'acide chlorydrique à 0,05 N et titration au Complexon M/1000 (suivant la méthode que nous indiquerons plus loin) nous a redonné pour un dosage en double, 47,1 γ et 50,9.

On peut donc penser que le Zinc faisant partie intégrante de la plante n'est pas volatilisé pendant une calcination prudente.

La possibilité d'une réduction de l'oxyde de Zinc formé au cours de la calcination par des particules charbonneuses est à écarter car cette réduction nécessite une température élevée.

BONASTRE et POINTEAU (1) dosant le Cuivre et le Zinc dans les vins, utilisent également la calcination à une température ne dépassant pas 500°. Mme L. BOUZIQUES et M. BOUZIQUES (2) dosant le manganèse dans les vins indiquent comme procédés minéralisateurs équivalents, l'attaque NO_3H/perhyrol et la calcination à 500°.

JACQUIN (9) dosant le Cuivre et le Fer dans les pommes, les poires et le cidre, utilise également la calcination à 500°.

Nous avons donc adopté en définitive, la minéralisation par calcination.

A cause du Zinc, on doit employer des capsules de quartz.

La porcelaine a une couverte qui peut contenir du Plomb. Le platine est légèrement attaqué à la reprise par HCl.Pb et Pt sont extraits par la dithizone dans des conditions voisines de celle du Zinc, et les séparations sont difficiles.

Nous utilisons donc des nacelles de quartz de 30 × 60 mm, qui permettent d'incinérer 1 g de poudre légère et 2 g de poudre lourde.

Les calcinations à 500° sont longues, mais on peut mettre un grand nombre de nacelles dans un four électrique.

Il est parfois difficile d'obtenir des cendres blanches, par exemple avec des graines de lin.

D'après nos essais, on pourrait calciner à 550°, avec les mêmes résultats à condition de démarrer lentement, mais si l'on désire doser le manganèse sur la même attaque, il est important de rester à très basse température pour éviter la formation d'oxydes peu solubles.

En cas de points noirs dans les cendres, on reprend par un peu d'eau déminéralisée, et on filtre sur petit filtre sans cendres (Laurent). Le filtre est remis dans la nacelle, séché, et calciné à 550°. On termine au besoin la calcination après addition d'une goutte de perhydrol.

Nous avons constaté que les filtres utilisés, que nous rinçons au préalable à l'acide chlorydrique 0, 05 N ne contribuent pratiquement pas aux résultats du blanc.

Les cendres sont alors reprises par quelques gouttes d'acide chlorydrique pur, coupé de son volume d'eau. On évapore doucement à sec l'excès d'acide. Il ne faut plus calciner quand les métaux sont ainsi transformés en chlorures.

On reprend par quelques gouttes d'acide chlorydrique N, on filtre pour éliminer la silice, on lave, en joignant aux précédents filtrats et on amène à 50 ml.

Dosage du Zinc.

Nous avons essayé trois méthodes :

1° *Méthode colorimétrique à la dithizone.*

Nous avons exactement suivi la méthode de CHABANNES, TROCME et BARBIER (3).

C'est une méthode de traces, intéressante quand on dispose de très peu de matière. On mesure finalement 0,1 à 2 γ de Zn.

Cette méthode nous a paru longue. La préparation des réactifs nécessite de nombreuses manipulations. Les solutions diluées de dithizone s'oxydent facilement et, ainsi que le signalent les auteurs, les teintes obtenues avec des quantités constantes de Zinc peuvent varier avec les solutions de dithizone et le pH du tampon. Il faut faire une gamme de comparaison pour chaque série de dosages, et ne pas changer de réactifs en cours de série.

2° *Méthode volumétrique au Complexon.*

Nous avons donc cherché à éliminer la colorimétrie, et à simplifier le travail de purification des réactifs.

Pour éliminer la colorimétrie, nous avons cherché à prendre avantage du fait que l'un des meilleurs dosages de métaux par le Complexon III est celui du Zinc, en présence du Noir d'Eriochrome T. La réaction est tellement sensible que l'on peut utiliser des solutions M/1 000 du Complexon III.

Reste l'élimination des éléments gênant le titrage au Complexon — en particulier le fer, le manganèse, l'acide phosphorique, des traces de silice, etc...

Nous avons d'abord pensé éliminer un grand nombre d'ions par une résine échangeuse. Ce serait là une méthode simple et rapide.

Malheureusement trop peu de travaux ont été faits sur l'emploi des résines échangeuses en chimie analytique, et malgré des résultats encourageants, nous n'avons pas voulu consacrer un temps trop long à la mise au point de la séparation du Zinc par ce moyen.

3° *Méthode volumétrique avec isolement du Zn par la dithizone.*

Nous avons donc repris le procédé classique d'isolement du Zinc par extraction à la dithizone, mais, comme nous terminons par une titration au Complexon III, nous avons à masquer les dernières traces de métaux gênants dans la solution même soumise au titrage.

Pour l'extraction du Zinc de la solution aqueuse faiblement chlorydrique nous n'employons pas la dithizone dans le tétrachlorure de carbone, mais une solution tampon au citrate d'ammonium contenant de la dithizone JACKSON (8) et l'extraction se fait ensuite par le tétrachlorure de carbone pur. Nous expliquerons le mode opératoire en détail un peu plus loin.

D'après CHARLOT et BEZIERS (4) l'extraction du Zn par la dithizone est totale entre pH = 6, 5 et 10 mais plus la solution est alcaline, plus l'extraction est lente et difficile. Le pH qui nous a semblé le plus favorable est $8 \pm 0{,}5$.

On fait repasser le Zinc des extraits au tétrachlorure en phase aqueuse à l'aide d'une solution d'HCl 0,05 N.

Une solution trop acide obligerait à une neutralisation avant titrage, donc à l'augmentation du blanc mais une acidité insuffisante (pH 2,5) laisserait du Zn lié à la dithizone.

Il faut faire plusieurs extractions, avec agitations énergiques.

Quelques métaux : Ni, Co, Pb... peuvent avoir été extraits en même temps que Zn. On masque alors tous les métaux, y compris le Zinc, par du cyanure de potassium en présence de tartrate, après adjonction du tampon NH_4Cl/NH_4 et du Noir d'Eriochrome.

La coloration, violette avant addition de KCN, doit passer au bleu. Si elle reste violette, c'est que des métaux autres que Zn, tel que Pb, Mn... sont présents. On peut essayer de les neutraliser par quelques gouttes de Complexon, mais le mieux est de refaire une extraction en présence de thiosulfate.

Dans quelques-uns de nos dosages, le métal gênant était Mn. Cela peut arriver si l'on extrait en milieu trop alcalin, ou si on a fait passer avec le tétrachlorure le léger précipité brun qui reste généralement à la limite de séparation des deux phases.

Notons que Ca et Mg ne sont pas masqués par KCN, mais ils ne sont pas extraits par la dithizone.

En ajoutant quelques gouttes de formol à 4 p. 100, le Zinc seul est libéré et la teinte repasse au violet. On ajoute alors du Complexon M/1 000 jusqu'à retrouver la teinte bleue,

Le formol pourrait libérer également le cadmium, mais cet élément n'est pas cité comme élément en quantité appréciable dans les plantes, et d'autre part, il n'est extrait par la dithizone qu'à partir de pH = 12.

Du volume de réactif M/1 000, on soustrait le volume utilisé pour le blanc et on calcule enfin la quantité de Zinc dans la plante.

Avant de donner le mode opératoire détaillé, nous allons dire comment on peut doser le cuivre et le manganèse sur la même prise d'essais.

Dosage du Manganèse.

Nous avons vu que l'on reprend les cendres par HCl N et que l'on amène à 50 ml.

Si l'on emploie la méthode à la tétrabase DUCET-BATS-Mme DUPOUY-BRAS (6) très sensible, il suffit de prélever 0,5 à 1 ml de cette liqueur. En fait, on prélève 5 ml, que l'on dépose provisoirement dans un petit verre.

Par ailleurs, il est utile de connaître l'acidité exacte de cette liqueur. On fait donc un second prélèvement de 5 ml sur lequel on dose l'acidité.

Dosage du Fer.

Etant donné la faible prise d'essai nécessaire au dosage du Manganèse, on peut doser également le Fer, sur 1 ou 2 ml par une méthode à l'*o*-phénanthroline, ou au Nitroso R_4 s'il y a beaucoup de Cuivre.

Dosage du Cuivre.

Les 40 ml restant après ces 2 prélèvements sont versés dans une ampoule à décanter, on neutralise au pH = 4,5 et on extrait le cuivre par l'alcool isoamylique contenant de la diquinolyle 2-2′ suivant à peu près les méthodes décrites par COPPENET (5) et par JACQUIN (9).

Nous n'avons pas retenu l'extraction du Cuivre par la dithizone, bien que cette extraction puisse se faire en liaison avec celle du Zinc, car la colorimétrie des mélanges dithizone + dithizonate de cuivre, ou l'élimination de l'excès de dithizone présente de grosses difficultés (CHARLOT et BÉZERS (4)) surtout pour des traces de Cuivre aussi faibles que celles contenues dans nos échantillons.

La solution claire provenant de l'extraction du Cuivre contient tout le Zinc, et est en conséquence utilisée pour ce dosage.

MODE OPÉRATOIRE COMPLET ET DÉTAILLÉ DES DOSAGES SUCCESSIFS DU CUIVRE, DU MANGANÈSE ET DU ZINC DANS LES PLANTES, UTILISÉ PAR LA STATION AGRONOMIQUE DE ROUEN.

I

A. — Préparation de l'échantillon.

Partir de l'échantillon de réserve, passant au tamis n° 25 des stations (ouver. maille = 0,6 mm) à peu près en équilibre d'humidité avec l'atmosphère ambiante. En broyer quelques grammes dans un broyeur à billes à récipient

en acier inoxydable (Broyeur Dangoumeau) de façon à faire passer l'ensemble du produit ainsi homogénéisé à travers le tamis n° 60 (0, 25 mm d'ouverture de maille). Mettre en petit flacon propre et bien bouché.

B. — **Minéralisation.**

Peser un gramme de cet échantillon dans une nacelle de quartz de 30 × 60 mm. Passer 4 heures à l'étuve à 105° et peser pour avoir l'humidité. Porter au four électrique tiède et monter très lentement la température jusqu'à 500°. Laisser à cette température jusqu'à ce qu'il n'y ait plus apparemment de points charbonneux.

Préparer un entonnoir avec un petit filtre sans cendres de bonne qualité, sur un ballon jaugé de 50 ml. Laver le filtre et le ballon avec la solution d'acide chlorydrique 0,05 N puis avec de l'eau complètement déminéralisée. Reprendre les cendres par quelques ml d'eau déminéralisée, filtrer, laver légèrement à plusieurs reprises. Remettre le filtre, plié, dans la nacelle de quartz. Sécher à l'étuve. Calciner lentement en montant cette fois jusqu'à 550°.

Dissoudre les cendres par 0,5 ml d'HCl pur sur plaque chauffante. Ajouter 1 à 2 ml d'eau déminéralisée. Aller à sec.

S'il reste quelques points noirs, ajouter quelques gouttes d'H_2O_2 concentrée pure, et aller doucement à sec. Recommencer au besoin l'addition d'H_2O_2 jusqu'à disparition des points noirs.

Reprendre l'extrait sec par HCl N, filtrer dans le ballon de 50 ml qui a déjà reçu le premier filtrat. La silice reste sur le filtre, laver, laisser refroidir. Compléter à 50 ml.

Préparer en même temps un ballon témoin avec les mêmes quantités d'HCl et H_2O_2.

C. — **Détermination de l'acidité de la solution.**

Prélever exactement 5 ml et titrer l'acidité à l'aide d'une liqueur alcaline et d'un indicateur usuel.

II

Dosage de manganèse par le tétrabase.

Prélever exactement 5 ml et les mettre en attente dans un petit récipient. Il doit rester exactement 40 ml dans le ballon jaugé pour les dosages ultérieurs.

A. — **Réactifs.**

Nota : Les produits de base doivent être aussi purs que possible et en tout cas exempts de manganèse.

1° NaOH en pastille, 15 g.

Dissoudre dans 180 ml d'eau déminéralisée.

Ajouter 58 ml d'acide acétique pur.

Puis 0,24 g de PO_4H_2K.

Compléter à 250 ml.

Au moment de l'emploi, dissoudre en chauffant légèrement, 3 mg de périodate de sodium par ml de tampon. Le réactif obtenu doit s'employer dans les quelques heures qui suivent.

2° Réactif à la tétrabase :

0,5 g de tétrabase (tétraméthyldiaminophénylméthane).

Dissoudre dans 6 ml HCl 2N et diluer à 100 ml.

3° Solution étalon.

Dissoudre 0,3075 gr de SO_4Mn, H_2O dans 1 litre d'eau déminéralisée

Pour construire la gamme étalon, diluer au 1/100 — 1 ml correspond alors à 1 γ (microgramme) de manganèse .

B. — **Mode opératoire.**

Les limites pratiques du dosage se situent entre 0,2 et 1,5 γ. La prise d'essai est prélevée en conséquence, au besoin après dilution des 5 ml réservés. Si on ne connaît pas la richesse en Mn du produit, on opère d'abord sur 1 ml.

Placer la prise d'essai dans un ballon de 25 ml puis 2 ml d'eau déminéralisée et de la soude 0,1 ou 0,01 N en quantité calculée pour obtenir pH=6,5 ; on utilise pour le calcul, le résultat du titrage d'acidité signalé auparavant.

Verser ensuite 2 ml de tampon phosphate-périodate. Ajouter 0,4 ml de solution de tétrabase. Compléter à 25 ml.

Il se développe une teinte verte. Colorimétrer après 10 minutes.

Avec le colorimètre tricellules Jobin Yvon, nous utilisons le filtre n° 70 (rouge).

Établir au préalable une courbe d'étalonnage par exemple avec 0,2-0,5 1-1,5γ de Mn.

Colorimétrer une quantité correspondante du témoin comprenant tous les réactifs de minéralisation et de neutralisation.

III

Dosage du cuivre par la diquinolyle 2-2′.

A. — **Réactifs.**

Nota : Tous les réactifs doivent être aussi purs que possible et en tout cas exempt de cuivre.

1° Solution de NaOH ou KOH 2 N.

2° Solution de tartrate de soude à 20 p. 100.

3° Solution de chlorydrate d'hydroxylamine à 20 p. 100.

4° Alcool isoamylique contenant 0,02 p. 100 de diquinolyle 2-2′.

5° Solution étalon de cuivre. Dissoudre 392 mg de SO_4Cu $5H_2O$ dans 100 ml. Diluer 1 000 fois une partie de cette solution mère pour obtenir une solution de travail à 1 ml = 1 γ de Cu.

B. — **Mode opératoire.**

Verser les 40 ml restant après les précédents prélèvements, dans une ampoule à décanter.

Ajouter une quantité calculée de solution NaOH pour amener le pH à 4,5. Vérifier avec un bon papier indicateur.

Ajouter 2 ml de la solution de tartrate, puis 2 ml de la solution d'hydroxyl-

amine, et enfin 5 ml d'alcool amylique contenant la diquinolyle mesurée par exemple à l'aide d'une burette graduée.

Agiter énergiquement pendant quelques minutes. La solution isoamylique se colore en rose s'il y a du Cuivre, et se rassemble en surnageant.

Soutirer quand la phase aqueuse est devenue claire, dans le ballon de 50 ml déjà utilisé et le mettre de côté pour le dosage du Zinc.

On peut, pour être sûr d'avoir la totalité du liquide aqueux, laisser une goutte de l'alcool isoamylique et filtrer dans un ballon de 50 ml sur filtre mouillé. D'ailleurs cette solution colorée isoamylique doit être transvasée sans eau dans la cuve du colorimètre.

Comme la coloration est stable, on recueillera les solutions d'une même série, dans de petits poudriers bouchés au polythène, afin de les colorimétrer en même temps.

Préparer par ailleurs un blanc comprenant tous les réactifs et une gamme étalon, par exemple de 6 points entre 2 et 20 γ.

Par la suite, il suffit d'introduire 2 étalons dans chaque série pour réajuster la courbe.

Avec le photocolorimètre Bonnet-Maury, premier modèle, le filtre vert n° 13 nous a paru le plus convenable.

IV

Dosage du zinc par extraction à la dithizone et titration finale au complexon III.

A. — Réactifs.

Nota : Tous les réactifs doivent être aussi purs que possible et en particulier exempts de métaux extractibles ou dosables avec le Zinc.

On est cependant amené d'une part à repurifier certains des produits purs du commerce, d'autre part à purifier les récupérats du tétrachlorure de Carbone, réactif le plus coûteux pour le dosage.

1° Ammoniaque pure.

On est généralement obligé de redistiller ce produit dans un appareil tout en pyrex avec un rodage normalisé sphérique au col du ballon.

2° Acide chlorydrique pur. Ce produit doit être également redistillé.

On prépare ensuite une solution 0,05 N.

3° Tétrachlorure de Carbone.

Le produit pur du commerce contient toujours des traces de métaux. On le distille dans l'appareil en pyrex mentionné ci-dessus, en chauffant au bain-marie, dans une hotte bien ventilée.

Le tétrachlorure doit donner une coloration vert franc avec la dithizone. Pour faire l'essai, on n'ajoute qu'une très faible quantité de dithizone, autrement les colorations de dithizonates métalliques seraient masquées par la coloration propre de la dithizone.

Par ailleurs, on récupère facilement le tétrachlorure chargé de dithizone en provenance des dosages. Pour cela, on agite, dans une ampoule à décanter le tétrachlorure avec 1/10 de son volume d'acide sulfurique pur. Celui-ci, se colore en violet. Après repos, on soutire SO_4H_2. On fait une deuxième extrac-

tion si le tétrachlorure est encore très coloré. On lave à l'eau, puis avec une solution de soude à 20 p. 100 puis de nouveau à l'eau et ainsi alternativement jusqu'à ce que le tétrachlorure soit incolore.

On distille ensuite le tétrachlorure, en présence de 1 à 2 g de carbonate de soude pur. On décante l'eau qui a pu passer dans le distillat, et on repasse celui-ci une seconde fois dans l'appareil.

4° Tampon Citrate/Dithizone.

Préparer une solution aqueuse avec 25 g d'acide citrique pur et de l'eau déminéralisée.

Si l'acide citrique contient un peu de fer, passer la solution sur une résine échangeuse H.

Verser dans un ballon de 500 ml et neutraliser en ajoutant peu à peu 50 ml d'ammoniaque pure. Diluer. Vérifier le pH. Ajouter à nouveau NH_4OH jusqu'à pH = 9,5. Compléter à près de 490 ml. Ajouter 0,2 g de dithizone et 10 ml de tétrachlorure de carbone pur. Agiter énergiquement. Laisser une demi-heure au repos.

La dithizone se partage entre le tétrachlorure et la solution alcaline. Le citrate prend une teinte orangée.

Verser la solution dans une ampoule à décanter. Séparer le tétrachlorure qui entraîne à l'état de dithizonate les ions métalliques gênants. Il est utile de faire une seconde extraction en ajoutant 10 ml de tétrachlorure pur dans l'ampoule. Agiter. Séparer. Le réactif est considéré comme purifié quand le tétrachlorure est vert franc, coloration due à la dithizone seule. Si les produits de base sont bien purs, 2 ou 3 extractions suffisent. Vérifier le pH qui doit être voisin de 9.

5° Tampon : NH_4Cl/NH_4 pour titrage au Complexon. NH_4Cl 54 gr. Ammoniaque concentrée : 350 ml ; eau q. s. pour 1 litre. Ce tampon n'est pas purifié et son action est comprise dans le blanc.

6° Formol à 4 p. 100. On passe ce produit sur une résine échangeuse H.

7° KCN solution à 10 p. 100.

8° Tartrate de soude à 5 p. 100.

9° Solution de Complexon III M/1 000.

Sel disodique dihydraté de l'acide éthylènediaminotétracétique.

10° Noir Eriochrome T (mélange à 1 p. 100 dans NaCl pur).

B. — **Mode opératoire.**

Verser dans une ampoule à décanter la solution restant après l'extraction du Cuivre. Cette solution doit être claire, sinon filtrer.

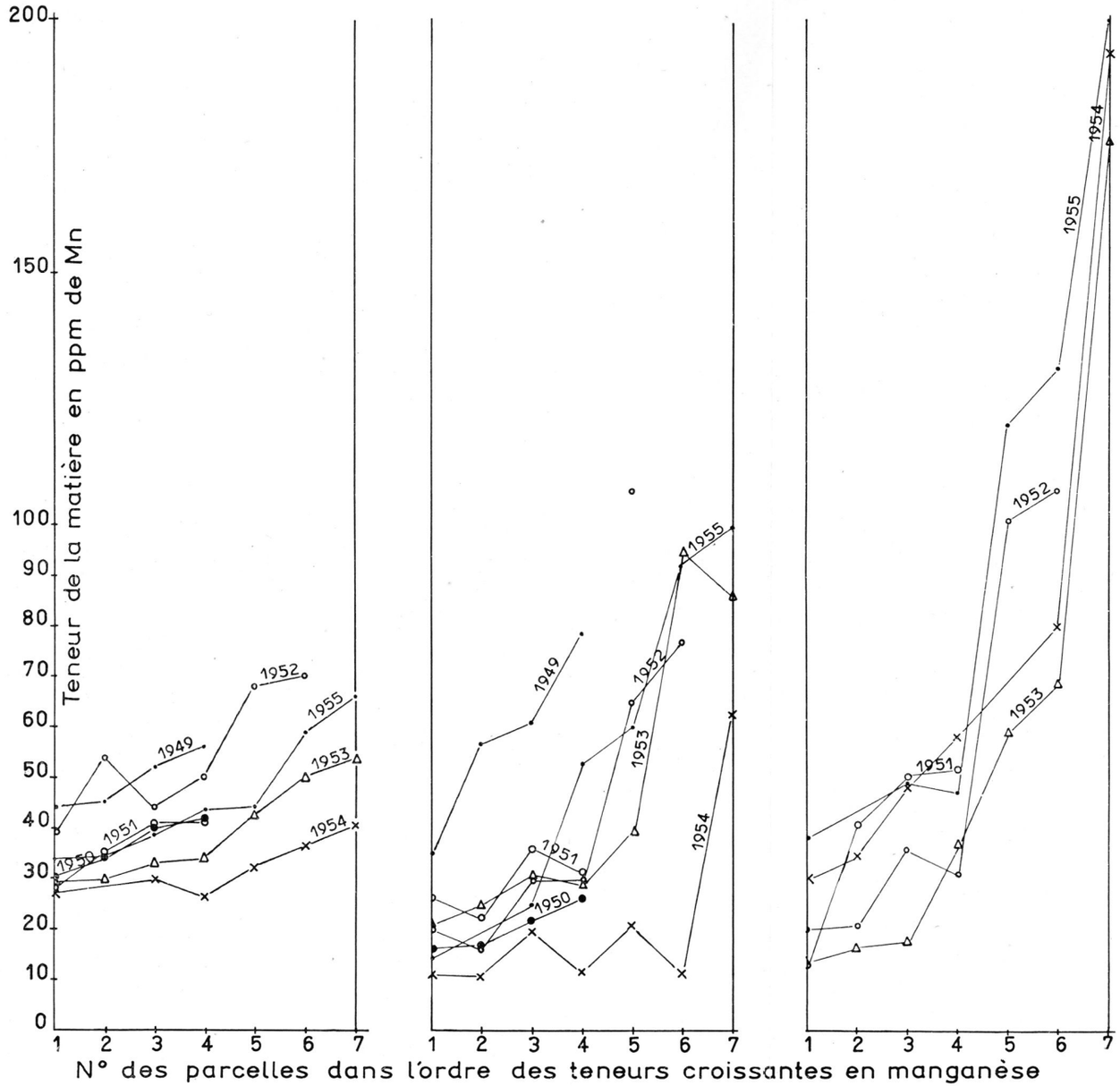
Si on n'a pas dosé le Cuivre, utiliser directement la solution provenant de la reprise des cendres.

Ajouter 25 ml de la solution tampon citrate/dithizone. Agiter. Vérifier le pH à l'aide d'une touche sur un papier sensible. S'il est inférieur à 7,5, ajouter quelques gouttes d'ammoniaque pure. Ajouter 5 ml de tétrachlorure, agiter.

Le tétrachlorure devient rouge s'il y a beaucoup de Zn, et violet s'il y en a peu.

Séparer le tétrachlorure en l'introduisant dans une seconde ampoule à décanter.

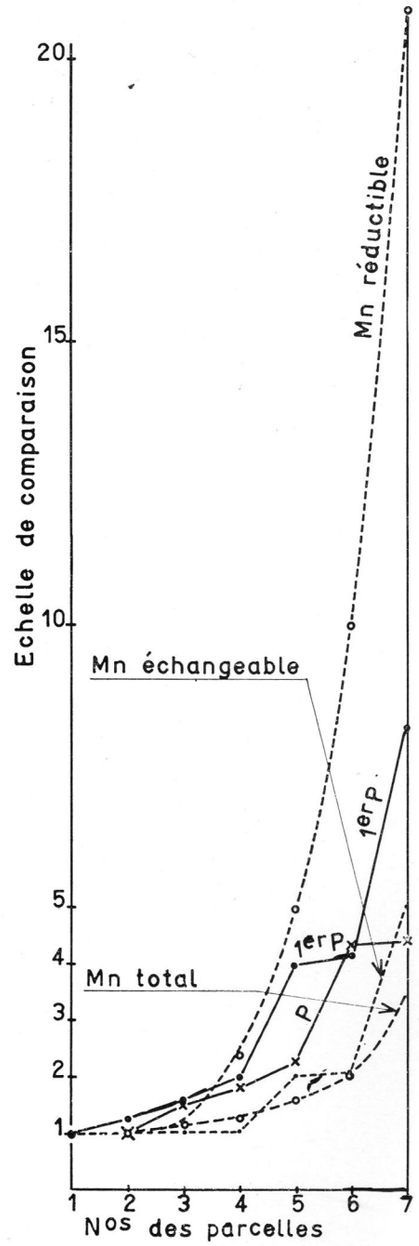
Extraire une seconde fois par 5 ml de tétrachlorure, décanter dans la seconde ampoule. Répéter ces extractions jusqu'à ce que le tétrachlorure soit franchement vert.



Graphique 3. — Teneur des grains à la récolte (G).

Graphique 4. — Teneur des pailles à la récolte (P).

Graphique 5. — Teneur des plantes entières au tallage (1er P).



Graphique 6. — Echelle de comparaison entre la teneur en Mn de la matière sèche et le Mn échangeable, réductible et total du sol.

Il doit toujours y avoir de la dithizone dans la solution aqueuse. Si celle-ci paraît trop décolorée, rajouter 10 ml du tampon citrate/dithizone.

Les extraits de tétrachlorure rassemblés dans la seconde ampoule sont agités avec 30 ml d'acide chlorydrique à 0,05 N.

Décanter le tétrachlorure dans une 3e ampoule. Filtrer la solution chlorydrique sur un filtre sans cendres lavé avec HCL, 0,05 N. Recueillir dans un ballon de titration à large col.

Recommencer le lavage avec 30 ml d'HCl, décanter, filtrer.

En pratique, faire deux lavages de 30 ml et deux de 20 ml. La solution de tétrachlorure doit redevenir verte, surtout si le Cuivre a été extrait.

Dans les 100 ml de solution chlorydrique ainsi obtenus, ajouter 1 ml de solution tartrale à 5 p. 100, 5 ml de solution tampon NH_4Cl/NH_4, quelques centigrammes du mélange Noir Eriochrome/NaCl (cette quantité est choisie pour avoir une coloration ni trop faible ni trop forte. Il faut ajouter la même quantité dans tous les dosages comparatifs. On se sert d'une petite mesure ad hoc) et 4 gouttes de la solution de KCN.

La coloration doit passer au bleu.

Ajouter ensuite 12 gouttes de formol à 4 p. 100. Après quelques secondes, la solution redevient violette.

Titrer au Complexon M/1 000 jusqu'à teinte bleue.

On utilise une microburette au 1/100e de ml. Le blanc a varié entre 0,2 et 0,3 ml. Les plantes ont fourni des volumes généralement voisins de 1 ml, mais pouvant atteindre 2 et même 3 ml. Le virage s'effectue sur 2/100 de ml pour les bonnes extractions.

Dans ces conditions, en admettant une erreur totale avec le blanc, de 5/100e pour un dosage net de 1 ml, l'erreur relative est de 5 p. 100 en ce qui concerne le titrage final.

Nous avons signalé qu'une petite quantité de Pb et surtout de Mn peut gêner le titrage final. Dans ce cas, si cette quantité est très faible, il y a seulement une petite modification de couleur au titrage, et on se contente de revenir nir à la même teinte avant et après addition du formol.

Si la modification de teinte est importante, ce qui dans nos essais, était généralement dû au Mn, il faut reprendre soigneusement l'extraction sur une nouvelle prise d'essai en évitant un milieu trop alcalin et en ne faisant pas passer le léger précipité brun déjà mentionné qui peut apparaître à la séparation des deux phases.

Si le Pb était le métal gênant, il faudrait ajouter du thiosulfate de sodium dans la phase aqueuse pour complexer Pb, par exemple 1 ml d'une solution à 25 p. 100.

Malheureusement le thiosulfate pur du commerce contient généralement du Zinc, et demande une purification longue et délicate.

V

Voici quelques résultats de dosages Cu, Mn et Zn dans les lins des champs expérimentaux du CETAL à la coopérative linière de la Région de Fontaine-Le-Dun, et sur diverses plantes prairiales du champ expérimental du Laboratoire des Plantes Fourragères de Rouen.

Dosage des oligoéléments : Zinc, Cuivre, Manganèse.
Quelques résultats en p. p. m. sur sec.

Références	Plantes	Zn	Cu	Mn
R 1668	Paille de lin, non traité, CETEAL	60	2,8	
R 1670	Paille de lin, traité, CETEAL ...	60	6,5	
R 1672	Paille de lin, d'un champ sain, CETEAL	70	9,8	
R 1668	Graine de lin, non traité, CETEAL	110		
R 1670	Graine de lin, traité, CETEAL ..	110	21,1	
R 1672	Graine de lin, d'un champ sain, CETEAL	120	21,0	
3 b D 3	Graine de lin, champ expérimental Isneauville	105	24,4	
R A T	Graine de lin, champ expérimental Isneauville	97	24,2	
R 1136	Paille de lin, Gueuteville.....	71	8,7	
28/4/58	Ray-Grass d'Italie, Isneauville ...		14,1	50,0
30/6/58	Ray-Grass d'Italie, même parcelle	88	6,3	37,0
16/10/58	Ray-Grass d'Italie, même parcelle	99	13,7	40,0
	Ray-Grass Berculo, Le Pin (Orne)	68	14,0	145,0
	Dactyle, Isneauville	72	10,0	32,0
	Luzerne, même parcelle	79	11,8	17,2
	Fétuque Isneauville.....	89	11,2	39,0
	Plantain Isneauville	120	14,3	17,5

VI

Dosage du zinc (et du cuivre) dans les sols.

Le dosage du Zinc facilement soluble ou facilement extractible des sols a fait l'objet de travaux assez nombreux.

La plupart des auteurs utilisent des solutions d'extractions acides, tamponnées ou non. L'acétate d'ammonium à pH = 7 habituellement employé pour obtenir les bases échangeables n'extrait pratiquement pas le Zinc. Une méthode soumet directement le sol à une solution de dithizone en milieu acétate d'ammonium neutre.

Nous donnerons en bibliographie les travaux que nous avons examinés sur ce sujet. Nous avons retenu qu'il était valable d'utiliser un réactif faiblement acide pour la mise en solution du Zinc.

Dans un travail précédent, nous avons eu à rechercher les teneurs en cuivre des sols de forêt du Pays d'Ouche après extraction à l'acide chlorydrique de pH = 2. Nous avons adopté ce même réactif pour l'extraction du Zinc.

Mode opératoire.

Agiter 15 g de terre avec 150 ml d'HCl de pH = 2 pendant 1 heure. Filtrer aussitôt.

Evaporer à 20 ml environ. Ajouter de l'eau oxygénée pure (environ 10 gouttes) pour détruire la matière organique. Faire bouillir sans aller complètement à sec. Reprendre par de l'eau déminéralisée, transvaser dans un ballon de 50 ml et jauger si l'on veut doser le Cuivre, ou directement dans une ampoule à décanter si on ne dose que le Zinc.

Opérer ensuite comme pour le dosage du Cuivre et du Zinc dans les plantes.

Si, au moment de titrer par le Complexon, on constate une teinte anormale due au Manganèse ou au Plomb, il convient de recommencer l'extraction ainsi qu'il a été expliqué pour le dosage des plantes.

Voici la méthode de purification complémentaire que l'on utilisera en présence de Plomb.

Amener la solution chlorydrique provenant de la reprise du Zn dans la dithizone au pH = 4,7 par de l'acétate d'ammonium ou par le tampon acéto-acétique de Morgan.

Ajouter 5 ml d'une solution à 10 p. 100 de thiosulfate de sodium pur, puis 5 ml de tétrachlorure de carbone à 0,01 p. 100 de dithizone.

Agiter fortement et longuement. Ou mieux, utiliser un agitateur mécanique par rotation horizontale. A ce pH, l'extraction est difficile.

Il est utile de faire deux extractions. La coloration du tétrachlorure ne doit plus varier quand l'extraction est terminée.

Faire repasser le Zinc en solution aqueuse par agitation du tétrachlorure décanté avec de l'acide chlorydrique 0,05 N et titrer au Complexon. Si la purification est réussie, il est inutile d'ajouter du tartrate de soude et du cyanure de potassium.

Faire un témoin avec les mêmes quantités de réactifs employées pour le dosage principal.

Résultats de quelques dosages.

N° ordre	Nature du sol	Métaux en p. p. m.	
		Cu	Zn
21 266	Terre maraîchère (traitée à l'oxyquinoléinate de Zinc)	9,7	162,0
21 321	Ambourville (S.-M.), alluvions anciennes peu acides	1,3	8,5
21 874	Prétot-Vicquemare (S.-M.), limon des plateaux peu acide	0,4	9,4
F 1 292	Braspart (Finistère), terre bruyère très acide, Ray grass	0,25	5,25
F 1 307	Braspart (Finistère), terre bruyère tourbeuse, défriche très acide	0,50	6,67
F 1 308	Braspart (Finistère), terre bruyère, tourbeuse, défriche très acide	0,35	5,75
F 1 321	Haras-du-Pin (Orne), prairie retournée, 0/10 cm acide	0,8	7,4
F 1 372	Isneauville (S.-M.), parcelle Ray grass Italie, 15/30 cm limon neutre	0,35	5,75
R 1 669	Environ de Fontaine-le-Dun (S.-M.), limon plateau léger neutre (CETAL)	0,67	14,0
R 1 671	Environ de Fontaine-le-Dun (S.-M.), limon plateau léger neutre (CETAL)	0,65	13,5
R 1 673	Environ de Fontaine-le-Dun (S.-M.), limon plateau léger neutre (CETAL)	0,50	13,8
R 1 752	Eslettes (S.-M.), limon des plateaux neutre	0,80	11,7

Discussion.

Les chiffres ci-dessus sont en général plus faibles que ceux trouvés dans la littérature.

Avec la solution à pH = 2, on ne touche pratiquement pas aux composés organiques.

D'autre part, l'augmentation du temps de contact augmente la quantité d'élément solubilisé, notamment pour le cuivre.

Pour 48 heures de contact, on a trouvé, en p.p.m. de Cu :

n° R 1669 : 0,99
R 1671 : 1,19
R 1673 : 1,31
R 1752 : 1,86

Mais d'autre part, une extraction prolongée entraîne la dissolution d'une plus grande quantité de cations gênants dans le dosage du Zinc. C'est pourquoi nous nous sommes limité à une extraction d'une heure.

RÉSUMÉ

Les auteurs se sont proposé de mettre au point une méthode de dosage du Zinc dans les plantes et dans le sol, plus pratique que la méthode par colorimétrie du dithizonate de Zinc actuellement préconisée.

Ils ont tiré profit de la bonne précision du titrage du Zinc par complexométrie (sel disodique dihydraté de l'acide EDTA et noir Eriochrome). Le virage final peut se faire sur 0,02 ml d'une solution M/1 000 de Complexon, soit 1,31 γ Zn.

Comme on peut titrer sur l'équivalent de 2 grammes de produit sec, l'incertitude est de l'ordre de 0,65 p.p.m. soit environ 1 p. 100 du Zinc dosé dans les plantes étudiées.

Pour les sols, le dosage final peut se faire sur 15 grammes avec également une incertitude d'environ 1 p. 100 du Zinc présent dans les terres de limon des plateaux du Caux.

L'isolement du Zinc a lieu par extraction à la dithizone, mais la purification des réactifs est simplifiée et les difficultés de la colorimétrie finale sont évitées.

Par ailleurs, les auteurs étudient rapidement le problème de la minéralisation des plantes et de l'attaque des sols. Pour les plantes, ils préconisent une calcination à température contrôlée au plus égale à 500°. Pour les sols, ils adoptent une attaque par HCl à pH = 2. La méthode finale de dosage par le Complexon pourrait s'ajuster à d'autres modes d'attaque.

Enfin, ils indiquent comment on peut doser, sur la même prise d'essai, le Cuivre, le Fer et le Manganèse.

Quelques résultats et une courte bibliographie complètent le mémoire

SUMMARY

Investigations on practical determinations of Cu, Zn and Mn in plants and soils, with a view to routine determinations in agricultural laboratories.

A more practical determination of Zinc than that by colorimetry of the dithizonate of Zn had been developed.

It is based on the high precision of the complexometric titration of zinc (by means of the dehydrated disodium salt of EDTA and Erichrome black). The final turning point of colour can be determined on 0,02 mg of a M/1,000 solution of complexone, corresponding to 1.31 γ Zn.

Since titration can be done on a sample equivalent to 2 g dry matter

the error amounts to 0.65 ppm, that is to about 1 % of the zinc in the plant material analysed.

With soils, the determination can be done on 15 g, with an error of about 1 % zinc present in the terrace loam of Caux.

The separation of zinc is done by means of dithizone, but the purifying of the reagents is simplified and difficulties in the final colorimetry are eliminated.

The problems of the ashing of plants and of the extraction of soils are briefly dealt with. It is recommended to calcinate plants at controlled temperatures of maximum 500°C, and to extract soils with HCl at pH 2. The method using complexone could also be adapted to other methods of extraction.

It is shown that copper, iron and manganese can simultaneously be determined on the same sample, and some results and a short list of references are presented.

ZUSAMMENFASSUNG

Untersuchungen über praktische Bestimmungsverfahren der Spurenelement : Cu, Zn, Mn in den Pflanzen und in den Böden zur Serienbestimmung in agrikulturchemischen Laboratorien.

Die Autoren haben sich vorgenommen ein Zinkbestimmungsverfahren in den Pflanzen und in der Böden auszuarbeiten, das praktischer als die zur Zeit benutzte Kolorimetrie der Zink-Dithizonverbindung.

Sie haben die gute Genauigkeit des Titrierens des Zinks durch Komplex bildung zu Nutze gemacht (EDTA und Eriochromschwarz). Der Endumschlag kann mit 0,02 cm^3 einen $n/1000$ Komplexonlösung erreicht werden, also mit einer Genauigkeit von 1,31 γ Zn.

Da das Titrieren mit einem Volumen gemacht wird, das 2 g Trockenmasse entspricht, liegt die Fehlergrenze bei 0,65 p.p.m. also bei ungefähr 1 % des bestimmten Zinks in den untersuchten Pflanzen.

Für Böden, kann das Titrieren mit einen Volumen gemacht werden, das 15 g Boden entspricht, die Fehlergrenze liegt ebenfalls bei ungefähr 1 % des in den Lehmböden der Caux Hochebene befindlichen Zinks.

Das Zink wird durch Dithizon extrahiert, aber die Reinigung der Reagenzien ist vereinfacht und die Schwierigkeiten der Kolorimetrie werden vermieden.

Andererseits, wird das Problem der Pflanzenmineralisierung und des Aufschlusses der Böden kurz untersucht. Die Autoren schlagen die Veraschung bei kontrollierter Höchsttemperatur von 500° für Pflanzen vor. Für Böden wurde der Aufschluss mit HCl bei pH = 2 angenommen. Das Bestimmungsverfahren mit Komplexon könnte auch bei anderen Aufschlussverfahren angepasst werden.

Endlich geben sie an wie man mit der selben Probenahme gleichzeitig Cu, Fe und Mn bestimmen kann.

Einige Ergebnisse und ein kurzes Schrifttum ergänzen diese Arbeit.

Изыскание практических методов определения олиго-элементов Cu, Zn, Mn *в растениях и почвах, в виду обще-принятого применения в земледельческих лабораториях.*

Е. ЖУИС и Mlle М. Т. ЛЕКАШЭ. (Руан.)

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Авторы поставили себе целью найти метод определения цинка в растениях и почвах более практичный, чем колориметрический метод цинкового дитизоната, предложенного в настоящее время.

Они использовали хорошую точность титража цинка комплексометрией (обезвоженная двунатриевая соль EDTA-кислоты и «noir eriochrome»). Конечный вираж может производиться на 0,02 cm³ N/1000 раствора комплексона, то-есть 1,31 γ цинка.

Так как титраж может производиться на количестве соответствующем 2 граммам сухого продукта, неточность (= ошибка анализа) определяется как 0,65 миллионных, то-есть, приблизительно 1 % от определенного в изученных растениях цинка.

В почвах, окончательное определение может производиться на 15 граммах с неточностью близкой к 1 % цинка, содержащегося в пылеватых почвах «plateau du Caux».

Изоляция цинка производится извлечением дитизоном (dithizone), но очищение реактивов упрощено и избегнуты трудности конечной колориметрии.

Кроме того, авторы изучают вкратце вопрос минерализации растений и почв. Для растений они советуют сжигание при контролируемой температуре, равной не больше 500 °. Для почв, они производят аттаку соляной кислотой, которой pH = 2. Конечный метод определения при помощи комплексона мог бы быть приспособлен к другим способам аттаки.

Наконец, они указывают, как можно определять, на той же навеске, медь, железо и марганец.

Некоторые результаты и библиографические указания дополняют эту работу.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) Bonastre (J.), Pointeau (R.). — Dosage polarographique des cations lourds dans les vins. *Chim. Anal.*, V, 39, n° 5, p. 194, mai 1957.

(2) Bouziques (Mme L.) et Bouziques (M.). — Dosage électrophotométrique de traces de manganèse dans les moûts et les vins. *Ann. Techn. Agric.*, 5e A, n° 3, p. 429, juillet 1956.

(3) Chabannes (J.), Trocme (S.) et Barbier (G.). — Observations sur la carence zincique du pommier. *Ann. Agron.*, 1re A., n° 3, p. 362, mai 1950.

(4) Charlot (G.) et Beziers (Mme D.). — Analyse quantitative minérale, 3e édition. Masson & Cie, Paris, 1955.

(5) Coppenet (M.), Ducet (G.), Calvez (Mme J.) et Bats (J.). — Microdosage colorimétrique du cuivre dans les végétaux par la 2-2-' Diquinolyle. *Ann. Agron.*, 5e A., n° 4, p. 597, juillet 1954.

(6) DUCET (G.), BATS (J.) et DUPOUY-BRAS (Mme.). — Notes analytiques. Méthodes de dosage colorimétrique rapide. *Ann. Agron.*, 2e A. nº 3, p. 367, mai 1951.
(7) DUVAL (C.). — Inorganic thermo-gravimetric Analysis. Elsevier 1953, p. 274.
(8) JACKSON (M. L.). — Soil Chemical Analysis. Prentice-Hall 1958 passim.
(9) JACQUIN. — Dosage du cuivre, du fer dans les pommes, les poires et les cidres. *Ann. Ttechnol. Agricole*, 7e A., nº 3, p. 259, 1958.
(10) KAHANNES (E.) et BRARD (D.). — Application de la méthode nitro-sulfoperchlorique de destruction de matières organiques au moyen de l'acide perchlorique. *Bull. Soc. Chim. Biol.* 294 — 305, 1932.

Le Directeur-Gérant : B. LACLAVIÈRE.

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 25-11-1959.

Dépôt légal : 4e trimestre 1959 *N° d'impression : 577*

631. 416. 872 : 634. 989. 84

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA MOBILISATION DU FER DES SOLS SOUS L'INFLUENCE DES LITIÈRES FORESTIÈRES

PAR

P. LOSSAINT

Institut de Botanique, Strasbourg

PLAN DU MÉMOIRE

CHAPITRE PREMIER

ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES ET DE LA DÉCOMPOSITION DES LITIÈRES UTILISÉES

I. — Méthodes et techniques de dosage.

II. — Origine et prélèvement des litières.

III. — Analyse physico-chimique des litières.

Cendres.
Calcium.
Azote.
Carbone.
Rapport Carbone/Azote.
Fraction éthéro-soluble.
Fraction hydrosoluble.
Évolution au cours de la décomposition.
a) Matières minérales hydrosolubles.
b) Matières organiques hydrosolubles.
L'acidité des litières — son évolution.
L'acidité titrable des extraits.

IV. — Vitesse de décomposition des litières.

a) Au laboratoire.
b) Sur le terrain.

V. — Relations entre la composition chimique et la vitesse de décomposition des litières.

CHAPITRE II

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA MOBILISATION DU FER D'UN SOL PAR LES LITIÈRES FORESTIÈRES

I. — Matériel et méthodes.

II. — Effet direct des litières en cours de décomposition.

1° Expériences préliminaires. Mise en évidence qualitative du phénomène.

2° Étude de l'influence de la nature des litières et de la durée de leur décomposition.

a) Expériences en étuve.

b) Expériences à la température du laboratoire.

3° Étude de l'influence des conditions d'aération.

III. — Effet des extraits stériles de litières :

1° Expériences par percolation.

2° Expériences par agitation.

a) Extraits de litières fraîches.

b) Extraits de litières décomposées.

CHAPITRE III

LES FACTEURS RESPONSABLES DE LA SOLUBILISATION DU FER PAR LES LITIÈRES

I. — Rôle quantitatif des substances hydrosolubles des litières.

II. — Rôle qualitatif des substances hydrosolubles.

A. — L'acidité des litières et de leurs extraits.

B. — Le pouvoir réducteur des extraits de litières vis-à-vis du fer.

1° Détermination du pouvoir réducteur des extraits. Principe et mise au point de la méthode.

a) Influence de la durée de contact.

b) Le fer est-il réduit ou complexé ?

c) Influence du pH du milieu.

d) Mode opératoire adopté.

2° Pouvoir réducteur des extraits de litières fraîches.

3° Évolution du pouvoir réducteur des litières au cours de la décomposition.

a) En milieu aérobie.

b) En milieu anaérobie.

C. — Le pouvoir complexant des extraits de litières vis-à-vis du fer. Principe de la méthode. Mode opératoire.

a) Influence du temps de contact.

b) Influence du pH sur le seuil de complexation.

c) Influence de la quantité absolue de fer présente.

d) Stabilité des complexes formés en fonction du temps.

1° Pouvoir complexant des litières fraîches.

a) Cas du fer ferrique.

b) Cas du fer ferreux.

2° Évolution du pouvoir complexant au cours de la décomposition.
a) En milieu aérobie.
b) En milieu anaérobie.
3° Stabilité des complexes extrait-fer.
4° Nature des complexes formés.
1) Cas général.
2) Cas des extraits de litière.
D. — Rôle des polyphénols.

III. — Essai d'établissement du rôle respectif de ces différents processus dans la solubilisation et le transport du fer.

Discussion.

Conclusions générales.

Bibliographie.

INTRODUCTION ET HISTORIQUE

La solubilisation, le déplacement et l'accumulation des composés du fer, consituent certainement les faits les plus marquants d'un grand nombre de types de sols répartis sur l'ensemble du globe.

La localisation verticale du fer, sous forme oxydée ou réduite, dans les profils de sols, la nature et la succession des horizons formés à la suite de l'individualisation et des migrations de cet élément, ainsi que les rapports quantitatifs caractérisant l'enrichissement et l'appauvrissement à différents niveaux, ont permis de déterminer le degré d'évolution des sols et de les classer en groupes et sous-groupes.

Cette constatation s'applique surtout à deux séries de sols qui sont très largement répandus sur l'ensemble des continents :

— la série des sols podzoliques des climats tempérés — sols lessivés, sols podzoliques, podzols ferrugineux et humo-ferrugineux — dans laquelle on observe une migration descendante croissante des éléments, du fer en particulier ;

— le grand groupe des sols tropicaux — sols ferallitiques sous climat équatorial humide et sols ferrugineux tropicaux sous climat tropical sec.

L'importance du fer n'est cependant pas moindre dans d'autres types de sols, tel le groupe des sols hydromorphes — sols à gley et pseudo-gley — qu'on peut bien caractériser grâce aux phénomènes de réduction plus ou moins accentués qu'y subit cet élément.

La mobilisation du fer est donc un phénomène très général. Aussi n'est-il pas étonnant qu'on ait accordé à cet élément une attention toute

particulière, dès le début des recherches pédologiques à la fin du siècle dernier.

Les travaux relatifs à ce sujet sont trop nombreux pour qu'il soit possible d'en faire l'historique complète dans le cadre de cette étude. Nous prions le lecteur de se référer à l'excellente mise au point de JOFFE (1949) sur l'historique des recherches sur la podzolisation.

Nous nous attacherons ici surtout à étudier les principaux travaux relatifs aux *mécanismes* de la mobilisation du fer.

Or, on constate qu'en dépit du nombre considérable de travaux consacrés à ce sujet, la libération du fer dans les horizons superficiels des sols pose encore de nombreux problèmes particulièrement en ce qui concerne les substances minérales ou organiques qui provoquent sa mise en solution, la forme chimique sous laquelle il se déplace, les conditions favorables à cette mobilisation.

D'après DEB (1949), plusieurs processus de migration de cet élément peuvent être envisagés.

A l'état d'*ions trivalents*, le fer ne peut guère se déplacer, aux valeurs de pH rencontrées dans le sol. En effet, à des pH supérieurs à 3,5 sa solubilité est extêmement faible (BRITTON, 1935 ; BEZIER, 1944, 1945).

L'*ion ferreux* est sensiblement plus soluble, mais en conditions normales, c'est-à-dire en l'absence de processus réducteurs tels qu'on les rencontre dans les sols hydromorphes, il se réoxyde très rapidement.

On peut également envisager la migration du fer sous forme de *dispersion colloïdale* de l'hydroxyde. Or, si l'oxyde de fer peut, par voie de peptisation, prendre la forme d'hydrosol, celui-ci est d'une grande instabilité ; s'il n'est pas protégé, il est facilement floculé par les électrolytes des solutions du sol. Par ailleurs, en raison de sa charge électro-positive, il est énergiquement fixé par l'argile colloïdale, qu'il peut ainsi accompagner dans sa migration sans s'en séparer (DEMOLON, 1952).

Il semble par conséquent bien établi que, pour qu'il puisse migrer, le fer doit être protégé contre la floculation. Cette protection ne peut se faire que par l'intermédiaire d'anions capables de former avec cet élément des combinaisons solubles aux acidités rencontrées dans le sol.

Un grand nombre de tels ions protecteurs, minéraux ou organiques, ont été proposés.

Ainsi, le mouvement du fer sous forme de *solution colloïdale* d'hydroxyde protégé par la *silice* a été envisagé par REIFENBERG (1927) et étudié en détail par DEMOLON et BASTISSE (1938). Ces deux auteurs ont également expérimenté le rôle éventuel des *ions phosphoriques*.

MATTSON et ses collaborateurs (1928-1932) ont montré, dans une série de publications, que Fe et Al pouvaient migrer à l'état de suspensions colloïdales positives en présence d'acides organiques ou de silice. C'est seulement en présence d'un grand excès de ces anions que les sesquioxydes seraient englobés dans des combinaisons électro-négatives.

Parmi les ions organiques susceptibles de remplir ce rôle protecteur, les *acides humiques* ont été maintes fois mis en avant depuis les expériences bien connues d'AARNIO (1913). DEB (1949) a repris récemment cette question et a pu montrer que, contrairement aux résultats antérieurs, la quantité d'humus nécessaire pour assurer la peptisation totale à pH voisin de 4 d'une suspension d'oxyde de fer à 100 p. p. m. n'excédait pas 30 à 40 p. 100 de la quantité de fer présente.

Parmi les autres constituants de l'humus, les *acides fulviques* semblent également jouer un grand rôle dans le déplacement du fer. Ces substances, qui d'après WILLIAMS (*in* GARKUSCHA, 1953) seraient produites lors de la décomposition fongique et aérobie des débris végétaux ligneux, sont très solubles, ainsi que leurs sels. DUCHAUFOUR (1957) a extrait des quantités appréciables de ce produit des horizons B de podzols. Il en conclut qu'ils sont responsables du transport du fer en profondeur.

LAATSCH (1937) attribue une grande importance aux *tanins* dans la mobilisation du fer des sols « marmorisés » à pseudo-gley des Chênaies.

L'hypothèse de la migration du fer sous l'influence *d'acides organiques à faible poids moléculaire* a également retenu l'attention des chercheurs.

D'après BASTISSE (1945), les composés ferriques des acides oxalique, tartrique, malique et citrique seraient très stables. DEB (1949) a montré qu'en solution, ces sels étaient capables de traverser des colonnes de terre sans que ces substances ne floculent totalement. GALLAGHER (1942) a réussi à obtenir une zone colorée en percolant une colonne d'un horizon B de podzol avec une solution d'acide oxalique M/10. Une méthode d'extraction du fer libre des sols est d'ailleurs basée sur cette propriété de l'acide oxalique (DEMOLON, 1952).

D'après THORP (1957), l'acide gallique serait capable de dissoudre des quantités assez importantes de fer.

Quelques auteurs se sont intéressés à *l'aspect biologique* de la solubilisation du fer.

Ainsi, STARKEY et HALVORSON (1927), ont étudié la mobilité du fer en relation avec la vie microbienne et ont pu mettre en évidence le rôle non négligeable des conditions d'oxydo-réduction.

ALLISON et SCARSETH (1942) trouvent que les sesquioxydes de fer peuvent être libérés par incubation anaérobie dans une solution de sucre.

ROBERTS (1947) étudia l'aptitude des cultures de différents microorganismes, y compris des levures et des actinomycètes à réduire l'oxyde ferrique et trouva que *Bacillus polymyxa*, isolé d'un sol, possédait cette propriété à un très haut degré.

Enfin, BETREMIEUX (1951) a pu préciser par des expériences nombreuses et en utilisant un matériel varié, le rôle de la fermentation sur la mobilité du fer et du manganèse.

BLOOMFIELD (1951) obtient une mise en solution du fer en incubant des sols argileux en présence d'extraits de divers végétaux et pense que la formation des gleys serait produite plutôt par la décomposition anaérobie de la matière organique que par l'intermédiaire de microorganismes spécifiques.

D'ailleurs, on accorde de plus en plus d'importance depuis quelques années aux phénomènes de réduction et JARKOV (1954, 1956) pense même que le départ de fer dans la podzolisation ne peut se produire qu'en milieu anaérobie et serait un phénomène purement saisonnier. Cependant, d'après cet auteur, la réduction du fer ne se ferait qu'en présence d'humus.

On voit d'après les travaux de ces différents chercheurs, travaux que nous confronterons d'ailleurs avec nos résultats, qu'une grande importance a été accordée aux matières organiques forestières dans les phénomènes d'entraînement du fer.

Cette action de la matière organique peut avoir des causes variées. En effet, on sait combien les débris végétaux apportés au sol diffèrent en quantité, composition chimique et périodicité de l'apport. La *quantité* de matière organique tombant annuellement sur le sol n'est pas la même sous tous les peuplements forestiers. En particulier sous forêts tropicales et équatoriales (JENNY, 1949 ; LAUDELOUT et MEYER, 1954) elle est nettement supérieure aux chiffres observés dans les régions tempérées par EBERMAYER (1876); ALWAY et ZON (1930); CHANDLER (1941): LEIBUNDGUT (1953).

Les propriétés physico-chimiques et biologiques des différentes litières apportées à l'état pur ou à l'état de mélange au sol, présentent une non moindre importance.

Cependant, la causalité des rapports végétation — matière organique — profil de sol, est loin d'être entièrement élucidée. Souvent les chercheurs ont tenté d'établir des relations de cause à effet entre les groupements végétaux et leurs sols correspondants et, si l'on est assez bien renseigné sur les types d'humus engendrés par les différentes litières et sous les différents climats, il n'en est pas de même de l'action de ces litières sur le sol, phénomène qui nécessite dans le milieu naturel une action très prolongée, par ailleurs souvent perturbée par l'intervention humaine.

On a bien observé une relation entre les propriétés de l'humus et celles des horizons minéraux correspondants. Ainsi la série évolutive, allant des sols bruns aux podzols humo-ferrugineux, illustre bien ces relations. L'intensité des déplacements du fer est d'autant plus grande que la quantité d'humus accumulée à la surface du profil est plus importante.

Cet humus brut est-il seul responsable du départ massif du fer dans le phénomène de la podzolisation, ou sa présence est-elle simplement une conséquence de l'appauvrissement extrême des horizons supérieurs par

suite du lessivage des substances nutritives ? Il semble que les deux alternatives soient possibles et qu'il se produise une évolution parallèle, marquée à la fois par une diminution du pouvoir de minéralisation de l'humus et un appauvrissement progressif des horizons minéraux.

Il est étonnant de constater qu'on s'est très peu préoccupé jusqu'à ces dernières années du rôle éventuel que pouvaient jouer les débris organiques forestiers dès la chute des feuilles et pendant les premiers stades de leur décomposition sur l'évolution des sols et en particulier sur la migration du fer qui est pourtant un phénomène extrêmement courant sous couverture forestière.

A l'époque où nous avons commencé ce travail, aucune indication n'existait sur l'influence des litières forestières. Cependant HENIN et BETREMIEUX (1950) avaient obtenu des résultats encourageants dans des expériences de migration du fer sous l'influence de la décomposition de paille et de luzerne broyées, et par la suite plusieurs auteurs se sont intéressés à ce problème.

Ainsi, BLOOMFIELD publia ses premiers travaux sur les litières d'essences néo-zélandaises en 1952. Au Canada DELONG et ses élèves SCHNITZER, COLDWELL, LUTWICK, obtinrent leurs premiers résultats en cette même année. LIVENS (1956) en Belgique étudia la désaturation en bases des sols forestiers limoneux sous l'influence des litières.

Nous-même avons commencé ce travail à la même époque et les principales observations ont été consignées dans une série de Notes à l'Académie des Sciences (LOSSAINT, 1953, 1954, 1956, 1957, 1958).

Dans le présent mémoire nous exposons, en trois parties, l'ensemble des résultats acquis :

Dans un premier chapitre, nous étudions les propriétés physico-chimiques et le pouvoir de décomposition des litières utilisées.

Une deuxième partie est consacrée à l'étude exprérimentale de l'action de ces litières en décomposition et le leurs extraits sur la mobilisation du fer.

Enfin, dans un troisième chapitre, nous recherchons les facteurs physico-chimiques responsables de la solubilisation et du transport du fer, et les conditions qui la favorisent.

CHAPITRE PREMIER

ETUDE DES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES ET DE LA DECOMPOSITION DES LITIÈRES UTILISEES

Les recherches sur la composition chimique et la décomposition des litières ont donné lieu à de nombreuses publications dont HANDLEY (1954) a fait, récemment, une excellente synthèse.

Le problème a été le plus souvent traité en vue d'une meilleure compréhension des causalités de la formation des différents types d'humus forestiers.

Ainsi, on a cherché à mettre en relation les propriétés des litières fraîches avec leur possibilité de donner lieu à la formation, soit de mull, soit de mor.

Dans le présent travail, il importait que nous connaissions la composition chimique du matériel végétal, avant d'aborder l'étude de son action sur le sol. De même, les recherches sur le pouvoir de décomposition des feuilles de différentes essences, nous seront d'une grande utilité dans les recherches sur les phénomènes de migration du fer.

Nous nous sommes cependant volontairement limités à l'étude des facteurs physico-chimiques susceptibles de nous intéresser dans les problèmes de lessivage, traités aux chapitres suivants. Néanmoins, les résultats de ces analyses permettront de formuler accessoirement quelques conclusions dignes d'intérêt.

En raison de la portée plus générale de l'étude des propriétés réductrices et complexantes de la matière organique forestière, et de la nécessité où nous nous trouvions de mettre préalablement au point des méthodes de mesures quantitatives de ces caractères, nous les traiterons entièrement au troisième chapitre.

I. — MÉTHODES ET TECHNIQUES DE DOSAGE

Toutes les analyses ont été effectuées sur le matériel végétal séché à 50° et finement broyé jusqu'à passage au tamis de 1 mm.

Cendres : La teneur en cendres des litières a été déterminée par calcination modérée à 700° d'un échantillon de 1 gramme de feuilles, au four à moufle, jusqu'à poids constant. On a pris soin de chauffer très progressivement pour éviter la fusion des sels alcalins qui entraîne généralement une calcination incomplète de la matière organique.

Calcium : La chaux est dosée par les méthodes habituelles, soit gravimétriquement après filtration du précipité d'oxalate de calcium à travers un creuset filtrant en porcelaine et calcination à 900°, soit par permanganimétrie après lavage du précipité d'oxalate et redissolution dans SO_4H_2 1/4 (CHARLOT et BEZIER).

Azote total : L'utilisation du réactif de Wieninger à base de Sélénium métallique a permis une minéralisation rapide et efficace. Un appareil de Parnas-Wagner a servi à la distillation de l'ammoniaque.

Carbone organique : La méthode de ANNE (1945) adaptée à l'étude des végétaux par ANSTETT (1950) donne de bons résultats.

Substances éthéro-solubles et hydrosolubles : Nous avons suivi les méthodes préconisées par WAKSMAN (1927).

Extraction à l'éther :

Des échantillons de 5 g sont extraits pendant 12 heures au Soxhlet chauffé électriquement. Le solvant est évaporé à sec et le résidu obtenu séché à 100° jusqu'à poids constant et pesé.

Extraction à l'eau froide et à l'eau chaude :

Le résidu de la première extraction est traité avec 150 cm³ d'eau distillée pendant 24 heures. La présence de restes d'éther empêche le développement de microorganismes. Après filtration l'extrait est centrifugé à 3 000 tours/mn jusqu'à obtention d'un liquide limpide qu'on partage en 2 fractions. Sur la première on détermine le résidu sec ; la deuxième est évaporée à sec également dans une capsule de silice, puis calcinée pour déterminer la quantité de *matières minérales hydrosolubles* et, sur le résidu calciné, le Ca *hydrosoluble*.

L'extrait obtenu à chaud au Soxhlet est analysé de la même manière que l'extrait froid.

pH : Le pH a été mesuré à l'aide de l'électrode de verre et d'un amplificateur électronique de marque HEITO, soit sur une suspension de poudre de litière dans l'eau distillée, soit sur les extraits. Dans le premier cas, le rapport eau-substance a été maintenu constant pour obtenir des chiffres comparables.

Les deux méthodes donnent des résultats assez voisins ; cependant, dans l'ensemble, les mesures de suspensions fournissent des chiffres plus bas que celles des extraits.

Acidité titrable des extraits :

Les extraits à froid et à chaud des différentes litières ont été titrés avec de la soude N/10 jusqu'à pH 10 environ, à l'aide d'un potentiomètre et d'un agitateur magnétique. La quantité de soude nécessaire pour amener l'extrait à pH 7 représente l'acidité titrable que nous avons exprimée en milliéquivalents pour 100 g de litière, sachant que 1 cc de soude N/10 correspond à 0,1 méq.

Dosage des tanins dans les extraits :

La poudre de peau chromée (Merck) adsorbe de façon sélective les tanins au sens général du mot. Cette méthode est utilisée couramment dans les analyses de contrôle des tanneries et constitue la méthode officielle de la Société internationale des Chimistes des Industries du Cuir.

200 cc d'extrait préparé à partir de 4 g de litière, sont mis en contact pendant 2 heures avec 3,6 g de poudre de peau. On agite par intermittence. On peut suivre facilement la vitesse avec laquelle la liqueur se détannise en observant la décoloration de celle-ci. On filtre sur papier et on recueille les 100 premiers cc qu'on filtre une deuxième fois à travers un creuset de Gooch G 4. Connaissant la teneur en matières hydrosolubles de l'extrait, il suffit de déterminer le poids sec des non-tanins pour obtenir par différence la teneur en tanins (Meunier et Vaney, 1936).

Détermination du pouvoir réducteur des extraits vis-à-vis du permanganate en milieu basique :

Prélever une aliquote de 2 à 5 cm^3 d'extrait. Ajouter 10 cm^3 de NaOH N/10 et 20 cc $KMnO_4$ N/10, puis faire bouillir pendant 10 mn exactement. Acidifier en ajoutant 10 cc de SO_4H_2 1/5 puis 20 cc d'acide oxalique N/10. On dose en retour, à chaud, l'acide oxalique en excès avec $KMnO_4$, ce qui permet d'en déduire la quantité de $KMnO_4$ consommée par la matière organique. Les résultats sont exprimés en cc de $KMnO_4$ normal pour l'extrait de 1 g de litière. Lorsqu'il faut plus de 12 cc de permanganate, on recommence le dosage avec une aliquote moindre.

II. — ORIGINE ET PRÉLÈVEMENT DES LITIÈRES

Comme l'ont montré les travaux de Wittich (1939, 1943, 1944) et de Broadfoot et Pierre (1939), la composition chimique des litières forestières est très variable, non seulement d'une espèce à l'autre, mais également à l'intérieur d'une même espèce selon les facteurs du milieu dans lequel la plante s'est développée. Ainsi, Chandler (1941) observe que l'action du sol sur la richesse en éléments nutritifs des feuilles d'arbres forestiers n'est pas la même pour tous les éléments. Les taux de N, P et K dans le sol semblent influencer favorablement la richesse en ces éléments des feuilles d'une espèce donnée, et ceci de façon plus importante que le Calcium et le Magnésium.

Néanmoins, cet auteur observe une bonne corrélation entre le pH de la surface du sol et la teneur en Calcium des feuilles de *Acer saccharum*. Le taux de Calcium passe de 1,7 à 2,7 p. 100 quand le pH s'élève de 4,5 à 6,8, toutes les autres conditions étant semblables. De même, Ovington (1953) trouve une corrélation positive entre le pH du sol et le pH de la litière de *Pseudotsuga taxifolia*.

L'âge de la feuille influe également sur sa composition. De nombreux travaux (Combes, 1929 ; Alway *et al.* 1934 : *in* Lutz et Chandler) ont montré que la teneur des feuilles en Ca, Mg, cendres augmentait pendant le développement de ces dernières, tandis que N, P, K et S diminuaient.

Il en est de même de la composition organique des feuilles. Les résultats obtenus par WAKSMAN (1938) indiquent une teneur moins élevée en substances hydrosolubles dans les feuilles âgées que dans les feuilles jeunes ; les taux d'hémicelluloses, de cellulose et de lignine étaient les plus élevés dans les feuilles anciennes, prêtes à tomber.

Il est vraisemblable que sur un même arbre, les feuilles d'ombre et celles de lumière n'ont pas la même composition chimique globale. Nous n'avons pas trouvé de données à ce sujet.

Parmi ces quelques facteurs, le sol est certainement celui qui a le plus d'influence sur la composition chimique des litières. Ce fait semble avoir été longtemps ignoré. Aussi, de nombreuses analyses de litières, qu'on peut trouver dans la littérature, n'ont-elles qu'un faible intérêt.

Origine des échantillons.

Les litières utilisées dans ce travail ont été prélevées en grande majorité dans le massif forestier du Herrenwald. Cette forêt, dont les sols et la végétation ont été étudiés pendant plusieurs années (LOSSAINT, 1951 ; LEMEE et LOSSAINT 1953, 1958), est établie sur les alluvions quaternaires d'une rivière vosgienne, la Zorn, qui y a déposé les sables roses siliceux provenant du démantellement des massifs de grès vosgiens situés plus à l'ouest. Les sols de cette forêt sont extrêmement acides. Des mesures de pH, effectuées en grand nombre (METTAUER, 1957), montrent que les valeurs s'échelonnent pour l'ensemble de la surface boisée entre 3,7 et 4,6. Les sols sont du type podzolique et leur profil présente à sa surface un horizon d'humus peu décomposé : des mulls acides aux endroits humides à Aulne et Frêne, un moder dans les bonnes stations à Chêne et Charme, un mor ou humus brut dans la Chênaie-Pineraie à Canche ou à Molinie ; leur partie inférieure est constituée par un horizon B de 50 cm d'épaisseur enrichi en sesquioxydes de fer.

L'ensemble de cette forêt est par conséquent relativement homogène au point de vue pédologique, ce qui permet de comparer les propriétés chimiques des litières. Certaines espèces absentes de ce massif forestier ont été prélevées dans les Vosges sur des sols semblables établis sur grès silicieux.

Mode de prélèvement des litières.

Elles ont toutes été récoltées en 1951 et 1953, dès la chute des feuilles en automne. En les ramassant sur le sol, nous n'avons prélevé que les feuilles fraîchement tombées et évité celles qui avaient séjourné depuis un certain temps sur la terre et qui risquaient d'avoir été lessivées par la pluie ou trop altérées par l'action des microorganismes.

En ce qui concerne certains résineux non caducifoliés qui perdent

leurs aiguilles pendant toute l'année, nous avons recueilli les échantillons en secouant de jeunes arbres de plantation, et récolté ainsi les aiguilles, qui étaient prêtes à tomber, sur une toile étalée sur le sol.

Toutes les litières étaient jaunies ou brunies, à l'exception des feuilles d'*Alnus glutinosa*, qui sont encore vertes au moment de leur chute.

La liste des espèces étudiées figure sur le tableau n° I.

TABLEAU I

Espèces		*Origine*
Carpinus betulus	Charme	Herrenwald
Alnus glutinosa	Aulne glutineux	—
Quercus pedunculata	Chêne pédonculé	—
Quercus rubra L. = *Qu. falcata* Michx.	Chêne rouge d'Amérique	—
Fagus silvatica	Hêtre	—
Betula verrucosa	Bouleau	—
Acer platanoides	Érable plane	—
Castanea sativa	Châtaignier	—
Abies alba	Sapin	Vosges
Picea excelsa	Épicéa	Herrenwald
Pinus silvestris	Pin sylvestre	—
Larix europaeus	Mélèze	Vosges

Les échantillons destinés à l'analyse ont été soigneusement triés pour éliminer les impuretés, séchés à 50° et moulus au moulin Gondran (1) jusqu'à passage au tamis de 1 mm.

III. — ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE DES LITIÈRES

Les principaux résultats figurent sur le tableau II.

Cendres : Les teneurs en cendres présentent une certaine variabilité d'une espèce à l'autre. Le Pin montre la valeur la plus basse avec 2,62 p. 100 et l'Érable plane la valeur la plus élevée avec 7,9 p. 100. Il n'existe pas de différence très nette entre les résineux en général et les feuillus, contrairement aux observations de BROADFOOT et PIERRE (1939).

JOFFE (1932) trouve une teneur moyenne de 2,54 p. 100 chez les résineux et 6,63 p. 100 chez les feuillus. Il semble que sur sols extrêmement acides, comme c'est le cas dans les localités où ont été effectués nos prélèvements, les différences entre ces deux groupes d'espèces s'amenuisent jusqu'à devenir peu significatives.

Calcium : On a attaché depuis longtemps beaucoup d'importance à la teneur en chaux des feuilles d'arbres forestiers, au double point de vue du réapprovisionnement en bases des horizons supérieurs des sols forestiers et de la réduction de l'acidité de ces horizons, qui entraînent une stimulation de l'activité faunistique et microbiologique, elle-même favorable à la formation d'humus du type mull.

(1) Nous tenons à remercier Monsieur P. ANNE, Directeur de la Station de Recherches Agronomiques de Colmar d'avoir bien voulu nous autoriser à nous servir du matériel de son laboratoire.

Les résineux, mis à part le Mélèze, montrent les valeurs les plus basses, conformément aux observations d'autres auteurs (*in* HANDLEY, 1954 ; MELIN, 1930 ; ALWAY, 1930 ; BROADFOOT, 1939 ; CHANDLER, 1941 ; WITTICH, 1939, 1943, 1944). D'après les chiffres relevés dans divers travaux les différentes espèces de Pins se distinguent toujours des autres Conifères par leur extrême pauvreté en chaux. Notons cependant que, prises isolément, certaines espèces de Conifères peuvent être plus riches en calcium que certains feuillus.

TABLEAU II

Propriétés chimiques de la litière non décomposée de différentes essences forestières.
Résultats exprimés en p. 100 de la litière séchée à 50°.

Espèces	Cendres	CaO	N	C	C/N	Fractions solubles			
						Éther	Eau froide	Eau chaude	Total eau
Aulne	5,15	2,05	2,64	50,7	19,9	11,9	15,05	10,3	25,35
Charme	5,48	1,46	1,53	47,6	31,1	6,0	15,6	10,0	25,6
Chêne péd.	6,9	2,13	1,09	49	45	5,0	9,2	12,25	21,45
Chêne rouge	4,6	1,9	1,18	48	40,6	7,06	11,5	11,95	23,45
Châtaignier	4,8	1,8	1,3	47	36,1	5,6	3,8	21,2	25
Érable plane	7,9	2,35	1,3	45,5	35	6,5	8,1	17,3	25,4
Bouleau	4	1,64	1,32	54,5	41,3	11,8	5,25	11,85	17,1
Hêtre	7,5	1,45	1,21	45,8	37,9	3,7	5,9	4,4	10,3
Mélèze	6,23	1,32	1,43	48	33,5	6,6	15,2	9,7	24,9
Épicéa	6,8	1,24	1,24	49	39,5	5,44	4,7	3,45	8,15
Pin	2,6	0,98	1,16	52,5	45,3	13,6	4,1	5,0	9,1
Sapin	5,9	1,59	1,39	58,7	37,9	6	4,42	5,52	9,9

Dans l'ensemble, les valeurs que nous avons trouvées sont très faibles. Ce fait est certainement en rapport avec la pauvreté en bases des sols sur lesquels les échantillons ont été prélevés (environ 1 méq pour cent T. S. de Ca à 40 cm de profondeur, en moyenne).

Azote : L'Azote est certainement l'élément le plus important de la litière. C'est l'un des facteurs essentiels qui règle la vitesse de décomposition des débris végétaux, comme l'a souligné encore récemment DUCHAUFOUR (1957). Les valeurs extrêmes trouvées dans nos analyses sont de 2,64 p. 100 pour l'Aulne et 1,09 p. 100 pour le Chêne pédonculé. La teneur élevée de l'Aulne, par rapport aux autres feuillus, s'explique aisément : les feuilles de cette espèce tombent à l'état vert en automne. Or on sait (LUTZ et CHANDLER, 1949 ; COMBES, 1926), que les feuilles vertes sont toujours plus riches en Azote que les feuilles mortes, par suite de la migration basipète des composés azotés avant le jaunissement. D'autre part l'Aulne, par ses mycorrhizes, est un fixateur d'Azote.

WITTICH (1939) fait la même observation avec l'Aulne blanc (*Alnus incana*) et le Robinier (*Robinia Pseudoacacia*). Comme le fait remarquer CHANDLER il n'y a pas de distinction nette entre les teneurs en Azote des Conifères et des feuillus.

Carbone organique et rapport C/N : Les teneurs en Carbone oscillent entre 45,5 et 58,7 p. 100 avec une valeur moyenne de 50 p. 100 de la matière sèche.

Le rapport C/N qui, d'après WITTICH (1943), est un bon indice du pouvoir de décomposition des litières est très variable. L'Aulne et le Charme présentent les valeurs les plus basses. Ce sont aussi les deux espèces, parmi celles que nous avons étudiées, qui se décomposent le plus rapidement.

Fraction éthéro-soluble : Les graisses, cires et résines, solubles dans l'éther, sont décomposées très lentement par les microorganismes (WAKSMAN, 1938). Ils peuvent, d'autre part, influencer la décomposition d'autres constituants végétaux. La détermination de cette fraction présente par conséquent un certain intérêt.

Les espèces les plus riches en substances éthéro-solubles sont le Pin (13,6 p. 100), l'Aulne (11,9 p. 100) et le Bouleau (11,8 p. 100). WITTICH (1943) aussi mentionne cette grande richesse du Bouleau. Quant à l'Aulne, sa valeur élevée est vraisemblablement due à la présence de chlorophylle plus ou moins altérée qui persiste après la chute des feuilles. La valeur la plus basse a été observée chez le Hêtre (3,7 p. 100).

Fraction hydrosoluble : La fraction hydrosoluble contient les substances qui sont libérées en premier lieu lors de la décomposition des litières. Sa détermination sera par conséquent d'une grande importance dans les questions de solubilisation du fer, que nous envisagerons plus loin.

Chez les litières fraîches, les teneurs en substances hydrosolubles totales peuvent varier du simple au double. Ainsi les feuillus en général, sauf le Hêtre, en sont très riches, puisque 17-25 p. 100, soit près du quart du poids sec, sont solubles dans l'eau. Les valeurs les plus élevées se rencontrent chez l'Aulne, le Charme, le Châtaignier et l'Érable, alors que le Hêtre, le Pin, le Sapin et l'Épicéa se distinguent par des valeurs inférieures à 11 p. 100. Le Mélèze, contrairement à toute attente, présente une valeur très élevée. Il est intéressant de constater que le Hêtre américain (*Fagus grandifolia*) montre des valeurs semblables à notre Hêtre indigène (BROADFOOT).

Évolution de la teneur en matières hydrosolubles totales au cours de la décomposition (Tableau III, fig. 1) :

Les dosages des matières hydrosolubles, après des périodes variables de décomposition allant jusqu'à 15 mois, montrent que pour toutes les

espèces étudiées les teneurs subissent une baisse pendant les cinq premiers mois. Elle est cependant plus importante chez le groupe des feuillus que chez les résineux où les variations sont peu sensibles. Après 15 mois on

TABLEAU III

Évolution de la teneur en substances hydrosolubles totales au cours de la décomposition.

Essences	Matières hydrosolubles totales % matière sèche						
	0	15 j	1	2	3	5	15 ms
Aulne	25,3	19,05	18,6	19,7	11,3	10,45	19,35
Charme	25,6	21,1	21,0	17,6	15,25	11,8	18,6
Chêne pédonculé	21,4	21,5	22,1	18,9	15,4	—	—
Chêne rouge	23,45	18,85	14,8	12,7	9,65	—	—
Hêtre	10,3	8,6	7,9	7,55	6,45	—	—
Épicéa	8,15	7,4	6,5	7,55	7,65	5,7	14,4
Pin sylvestre	9,1	7,5	8,7	6,15	6,15	4,9	9,45

assiste à une remontée des valeurs, pour les quatre espèces. Il est difficile de trouver une explication à ce phénomène.

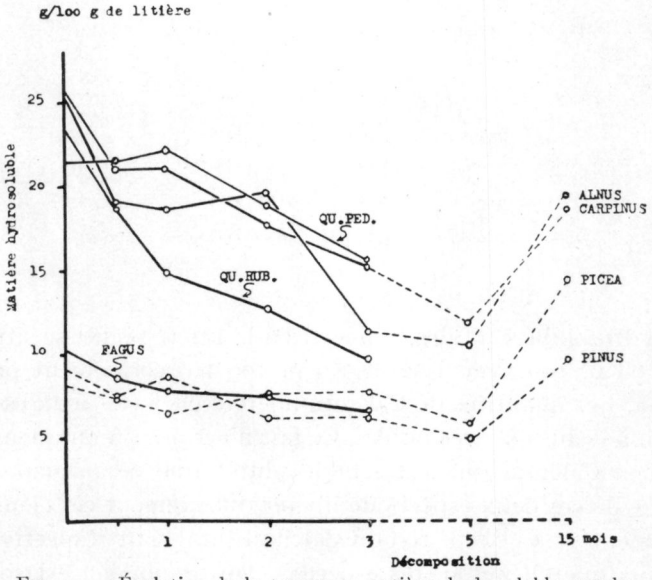


FIG. 1. — Évolution de la teneur en matières hydrosolubles totales au cours de la décomposition.

La diminution rapide des teneurs en substances solubles, donc facilement assimilables, chez les feuillus est certainement liée à une activité plus grande des microorganismes comme le montreront d'ailleurs les chiffres relatifs aux vitesses de décomposition.

Les matières minérales hydrosolubles.

Jusqu'à présent, on n'a attaché que peu d'importance aux matières minérables hydrosolubles, c'est-à-dire aux éléments minéraux facilement libérales dès le début de la décomposition des feuilles. Parmi ces éléments, les bases et essentiellement le Calcium, présentent un certain intérêt. Nous avons dosé dans les extraits, après évaporation à sec et calcination au four à moufle, les matières minérales totales par pesée, ainsi que le Calcium par permanganimétrie après précipitation à l'état d'oxalate. Les chiffres obtenus (tableau IV) montrent que les taux de matières minérales hydrosolubles totales, rapportés à la litière sèche, se situent entre 1,32 et 4,64 p. 100 avec 1,32 et 1,9 p. 100 respectivement pour le Pin et l'Épicéa. Les quantités de Calcium libérées chez ces deux essences par extraction à l'eau sont très faibles. Ce fait n'est pas dû uniquement à leur pauvreté en Calcium, mais il semble plutôt que ce soit une propriété intrinsèque de ces deux espèces de libérer difficilement cet élément, puisque seulement 17,3 et 8 p. 100 du Calcium total sont respectivement solubles, alors que chez d'autres espèces cette proportion est souvent supérieure à 25 p. 100 et peut même atteindre près de 40 p. 100 chez le Charme. En somme ces deux Conifères se caractérisent non seulement par une teneur faible en chaux, mais aussi par une solubilisation difficile de celle-ci. Par ailleurs, cette observation pourrait expliquer la faible remontée du pH des résineux au cours de la décomposition, comme nous le verrons plus loin.

TABLEAU IV

Matières minérales hydrosolubles de différentes litières.
Résultats exprimés en p. 100 de la litière sèche.

Essences	Mat. minérales solubles dans les extraits			CaO hydrosoluble dans les extraits			CaO hydrosoluble total % du CaO tot. des litières
	Froid	Chaud	Total	Froid	Chaud	Total	
Charme	1,21	1,57	2,78	0,27	0,31	0,58	39,8
Chêne péd.....	0,83	1,21	2,04	0,19	0,37	0,56	26,3
Chêne rouge	0,46	2,26	2,72	0,07	0,6	0,67	35,5
Bouleau	0,64	1,66	2,3	0,13	0,32	0,45	27,4
Érable	1,46	3,18	4,64	0,27	0,31	0,58	24,9
Châtaignier	1,58	0,62	2,2	0,34	0,05	0,39	21,6
Hêtre	1,21	1,61	2,82	0,18	—	—	—
Épicéa	0,63	1,27	1,9	0,03	0,07	0,1	8,06
Pin	0,63	0,69	1,32	0,09	0,08	0,17	17,3

COMPOSITION ORGANIQUE DES EXTRAITS DE LITIÈRE :

Si on connaît assez bien certaines propriétés physicochimiques des extraits aqueux de litières, telles leur acidité, leur teneur en azote total et aminé, leur rapport C/N, etc., on ne sait que peu de choses sur les corps organiques qui entrent dans la composition de ces derniers.

D'après WAKSMAN (1938), l'eau froide (18 à 20°), extrait les hydrates de carbone simples et leurs dérivés, différents aminoacides et peptides, les composés phénoliques et les substances minérales solubles. L'eau chaude met en solution l'amidon, une certaine quantité de pectines hexosanes et des composés azotés variés.

L'étude comparative de nombreuses espèces, telle que nous l'avons effectuée dans ce travail, montre une première grande différence entre les extraits des différentes litières : la couleur.

Les extraits de feuillus : Charme, Aulne, Chêne, Bouleau, Érable, ont à concentration égale, exprimée par rapport à la litière, une couleur beaucoup plus foncée que le Hêtre et surtout que les Conifères : Pin, Épicéa et Sapin. La couleur foncée est due à la présence de substances du groupe des *tanins*.

Ainsi, les réactifs classiques des polyphénols donnent une réaction positive avec le premier groupe d'espèces. Un essai de dosage semi-quantitatif a donné les résultats suivants :

Aulne	Charme	Érable	Chêne péd.	Chêne rouge	Pin	Hêtre	Épicéa	Sapin
+++	+++	+++	+++	+++	o	+	o	o

+++ = précipité intense.
+ = précipité très faible.
o = aucun précipité.

On a ajouté 1 cc d'une solution d'alun de fer à 1 p. 100 à 10 cc d'un extrait à 2 p. 100 (2 g de litière pour 100 cc d'eau).

De même, le réactif à la gélatine salée (BRUNEL) provoque un précipité abondant avec les extraits de feuillus.

Lorsqu'on imbibe des tampons de coton avec les liqueurs riches en tanin, et qu'on les observe à la lumière de WOOD (BRUNEL), on note une fluorescence vert jaunâtre. Au cours de la décomposition ces réactions diminuent d'intensité et dans certains cas deviennent pratiquement nulles après 5 mois.

Ces résultats ont pu être confirmés par un dosage de tanins des extraits de litières de Charme et de Pin fraîches et décomposées.

On voit que l'extrait de Charme contient environ 50 p. 100 de sub-

TABLEAU V

Évolution de la teneur en matières hydrosolubles, en tanins et en non tanins des extraits de litières au cours de la décomposition.

Résultats en g pour 100 g de litière sèche.

Essences	Nature de l'extrait	Teneur en mat. hydros.	Durée de la décomposition		
			0	1	3 ms
Charme	froid	totales	15,6	9,45	8,7
	—	non tanins	8,4	4,6	4,7
	—	tanins	7,2	4,8	4
	chaud	totales	10	11,6	6,6
	—	non tanins	4,1	6,4	4,4
	—	tanins	5,9	5,2	2,2
	total	totales	25,6	21	15,3
	—	non tanins	12,5	11	9,1
	—	tanins	13,1	10	6,2
Pin	froid	totales	4,26	3,05	2,49
	—	non tanins	4,12	2,93	2,51
	—	tanins	0,14	0,12	0
	chaud	totales	4,85	5,65	3,66
	—	non tanins	4,6	4,6	3,5
	—	tanins	0,25	1,05	0,16
	total	totales	9,1	8,7	6,15
	—	non tanins	8,72	7,5	6,0
	—	tanins	0,39	1,17	0,16

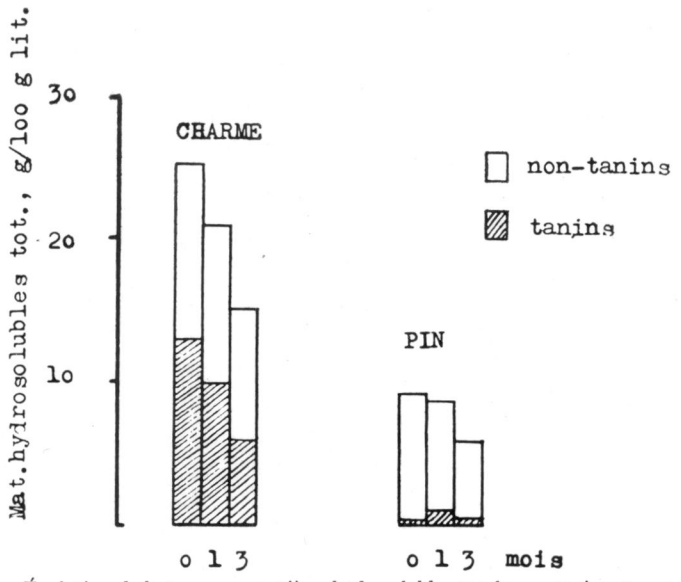


FIG. 2. — Évolution de la teneur en matières hydrosolubles totales, en tanins et en non-tanins dans la litière de Charme et de Pin au cours de la décomposition.

stances adsorbables par la poudre de peau (tableau V, fig. 2), alors que chez le Pin cette proportion n'est que de 5 p. 100. Au cours de la décomposition, la teneur en tanin baisse proportionnellement avec celle des matières hydrosolubles totales.

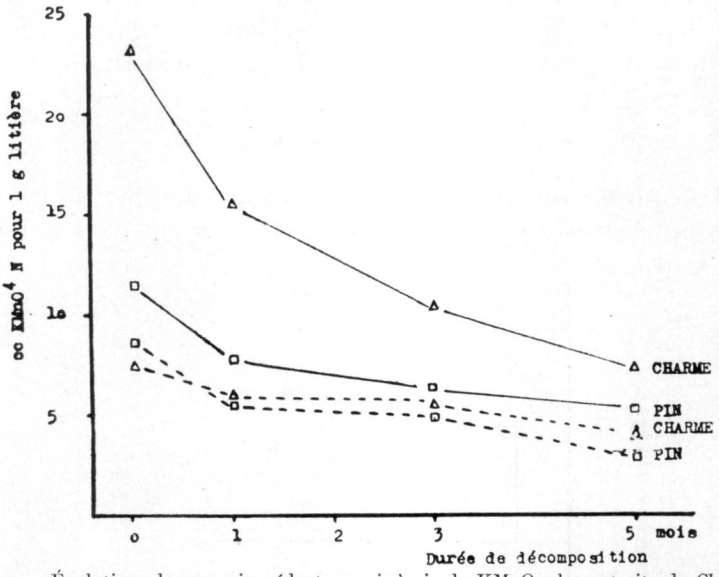


FIG. 3 — Évolution du pouvoir réducteur vis-à-vis de $KMnO_4$ des extraits de Charme et de Pin au cours de la décomposition : — extrait total, --- extrait détannisé.

TABLEAU VI

Étude du pouvoir réducteur des extraits de litières de Charme et de Pin, vis-à-vis du permanganate, avant et après détannisation par la poudre de peau chromée.

Résultats exprimés en cc de $KMnO_4$ normal pour l'extrait de 1 g de litière.

Essences	Nature de l'extrait	Détannisation	cc de $KMnO_4$ normal Durée de décomposition en mois				
			0	1	3	5	15
Charme	froid	avant	14,25	7,25	5,25	2,9	3,4
	—	après	3,9	2,77	2,61	1,8	—
	chaud	avant	9,0	8,38	5,13	4,38	2,76
	—	après	3,64	3,29	3,02	2,1	—
	total	avant	23,25	15,63	10,38	7,31	6,18
		après	7,54	6,06	5,63	3,9	—
Pin	froid	avant	5,8	2,9	2,75	2,6	1,8
	—	après	4,75	2,26	2,24	0,8	—
	chaud	avant	5,65	4,55	4,4	3,0	2,79
	—	après	3,87	3,69	2,62	1,95	—
	total	avant	11,45	7,45	7,15	5,6	4,59
		après	8,62	5,95	4,86	2,75	—

Nous avons également étudié le pouvoir réducteur à chaud vis-à-vis du permangante des extraits avant et après détannisation (tableau VI). Ce pouvoir réducteur atteint un niveau très semblable pour les deux espèces après détannisation, comme le montre la figure 3. La différence entre le Charme et le Pin réside par conséquent essentiellement dans leur teneur différente en substances polyphénoliques. On peut penser qu'il en est de même pour l'ensemble du groupe des feuillus et des résineux.

L'acidité des litières :

a) *Le pH des litières fraîches :* Depuis longtemps le pH est considéré par les pédologues comme un facteur très important dans la formation

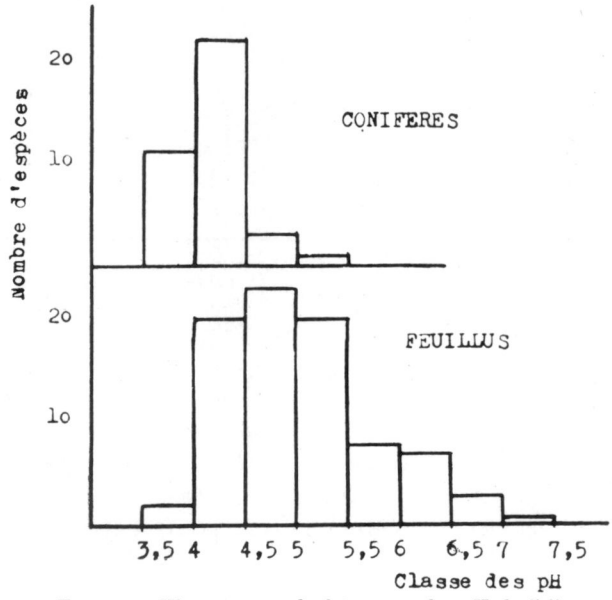


FIG. 4. — Histogrammes de fréquences des pH de litières observés par différents auteurs.

de l'humus. Généralement les sols à humus brut sont plus acides que les mull. Il semble par conséquent nécessaire de chercher s'il existe une corrélation entre la réaction des feuilles fraîchement tombées et leur possibilité de donner naissance à des humus du type mull ou du type mor. Ainsi on parle couramment d'espèces forestières acidifiantes ou améliorantes vis-à-vis du sol. Les résineux, et en particulier le Pin, sont considérés comme des espèces acidifiantes, alors que le Charme et l'Orme sont réputés comme des essences améliorantes. Nous avons recherché s'il existait une différence significative entre le pH des feuilles non décomposées de résineux et de feuillus en relevant dans la littérature les chiffres signalés

par les auteurs qui se sont préoccupés de cette question (HESSELMANN, PLICE, MELIN, MATTSON, *in* LUTZ et CHANDLER ; BROADFOOT, LOSSAINT). Malheureusement la méthode de préparation du matériel ainsi que la méthode de mesure du pH peuvent avoir une grande influence sur la détermination de cette valeur. Dans un grand nombre de travaux les indications de ce genre manquent complètement. D'autre part, beaucoup d'auteurs ne donnent pas de précisions sur les sols sur lesquels les arbres, dont provenaient les litières, étaient établis.

Le résultat de cette étude (voir fig. 4) montre que les chiffres obtenus avec 37 conifères se situent entre pH 3,5 et 5,5 avec un maximum

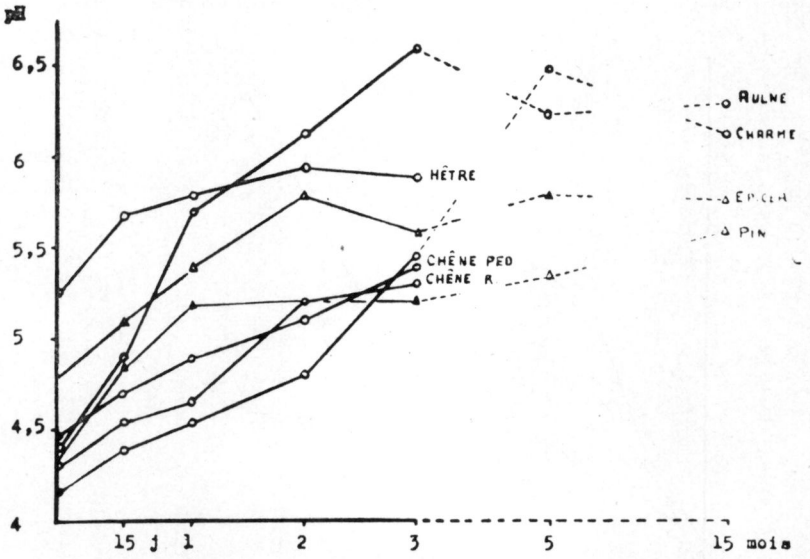


FIG. 5. — Évolution du pH des extraits aqueux de différentes litières au cours de la décomposition au laboratoire.

entre 4 et 4,5. Chez les feuillus (84 valeurs relevées), les pH sont nettement plus étalés puisqu'ils s'échelonnent entre 3,5 et 7,5 avec un maximum entre 4,5 et 5. L'ensemble des résineux se caractérise par conséquent par une réaction légèrement plus acide que celle des latifoliés. Les moyennes arithmétiques calculées à partir de ces données sont de 5,04 pour les feuillus et 4,17 pour les Conifères. Mais cette constatation peut être due au fait suivant : Nous avons vu, au début de ce chapitre, qu'il existait une corrélation entre le pH du sol et celui des litières. Or les résineux, étant des essences frugales, se contentant de sols pauvres et acides et se rencontrant fréquemment sur de tels sols, leur litière sera obligatoirement plus acide. Au contraire, certains feuillus sont beaucoup plus exigeants et nécessitent des sols mieux pourvus en bases, ce qui a pour conséquence d'augmenter leur pH.

D'une façon générale les litières étudiées dans ce travail sont extrêmement acides. Ceci tient certainement au milieu très désaturé dans lequel les plantes se sont développées. D'autre part, il semble que sur sols acides on assiste à une égalisation du pH des litières, alors que sur sols neutrophiles les valeurs de pH sont plus étalées. Il se peut que ce soit là la raison pour laquelle nous n'avons pas observé de différence entre les résineux et les feuillus. Les valeurs obtenues avec les extraits à froid s'échelonnent entre 4,15 pour le Charme et 5,25 pour le Hêtre (fig. 5).

b) *Évolution de l'acidité des litières décomposées :*

Au cours de la décomposition, l'acidité des litières diminue pour atteindre des valeurs se situant entre 5,25 et 6,5 après 3 mois. Après 15 mois

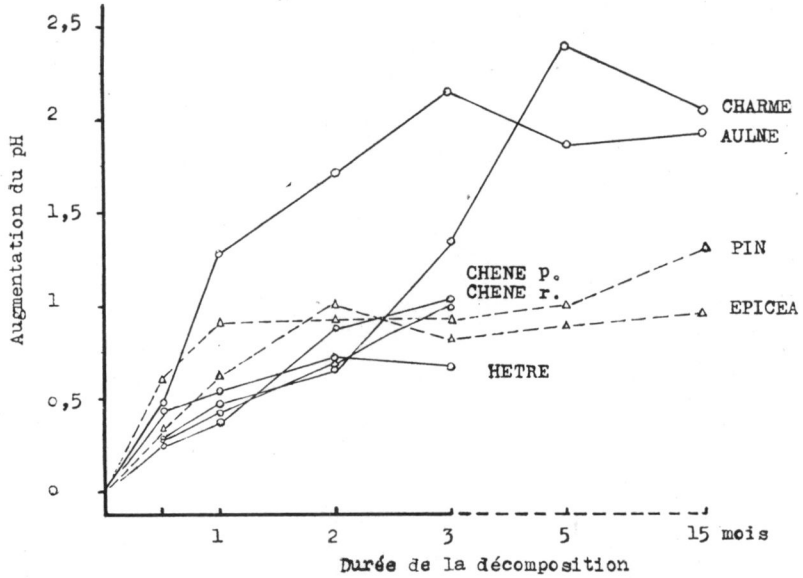


FIG. 6. — Augmentation du pH, par rapport à la valeur initiale, des extraits aqueux de litières, au cours de la décomposition.

de décomposition, l'Aulne et le Charme montrent des valeurs les plus élevées : 6 à 6,5, tandis que l'Épicéa et le Pin restent plus acides : 5,5-5,75. On voit très nettement sur la figure 5, que ces deux dernières espèces, ainsi que le Hêtre, ont tendance à former un palier après deux mois de décomposition, alors que le pH des deux feuillus continue à augmenter. Sur la figure 6 nous avons représenté l'*augmentation du pH* en fonction de la durée de décomposition par rapport au pH des feuilles mortes fraîches. Ici on constate également que les deux Conifères et le Hêtre présentent de faibles remontées de pH.

Il est intéressant de noter que ce sont les espèces chez lesquelles l'alcalinisation est la plus importante qui sont les plus riches en Calcium

et où cet élément est le plus facilement libéré (voir Ca hydrosoluble). D'autre part, la libération d'NH_3, par suite d'une ammonification intense, particulièrement chez l'Aulne, riche en Azote, contribue certainement à la remontée brutale du pH chez cette espèce.

Il semble donc que si le pH est un mauvais indice pour caractériser et séparer des groupes d'espèces quant à leur pouvoir acidifiant et améliorant initialement, il n'en est plus de même après un certain temps de décomposition, où l'on observe une nette tendance vers l'acidification de certaines espèces.

L'acidité titrable.

a) *Litières fraîches :*

L'acidité actuelle (pH) des extraits de litière ne fournissant pas de différence nette entre les feuillus et les résineux, nous nous sommes adressé à une autre forme d'acidité : l'acidité totale ou acidité titrable (tableau VII).

TABLEAU VII

Acidité titrable des extraits à froid et à chaud des litières non décomposées.

(Résultats exprimés en méq. p. 100 M. S.)

Essences	Extrait froid	Extrait chaud	Extrait total
Charme	19,2	15,9	35,1
Aulne	14,4	10,8	25,2
Chêne pédonc.	15	12	27
Chêne rouge	9,75	9,45	19,2
Bouleau	12,6	6,9	19,5
Érable	13,2	11,4	24,6
Hêtre	2,85	2,7	5,55
Épicéa	3,0	6,15	9,15
Sapin	8,25	6,3	14,55
Pin	7,5	6,0	13,5

La figure 7 montre les courbes de titration obtenues avec l'extrait à froid de 3,33 g de différentes litières. On voit sur le graphique de gauche qui correspond aux litières non décomposées, ainsi que sur le tableau VII, que les feuillus ont en général une acidité titrable plus élevée que les résineux. Ici encore le Hêtre fait exception et se range avec les deux Conifères. Alors qu'il faut 351 cm^3 de soude N/10 pour amener à pH 7 l'extrait total de 100 g de feuilles de Charme, celui de l'Épicéa ne nécessite que 95,5 cc, soit sensiblement 4 fois moins, et ceci malgré un pH initial peu différent.

WITTICH (1944) a pu faire un certain nombre d'observations semblables avec une *méthode légèrement différente*. En particulier il observe l'extrême pauvreté en acidoïdes des Graminées. MATTSON et KOUTLER-ANDERSSON (1941) de même observent les valeurs les plus faibles chez le Hêtre et le Pin.

b) *Litières décomposées :*

Pendant la décomposition (fig. 8, tableau VIII), l'acidité titrable diminue rapidement chez les feuillus et après 3 mois, la différence entre

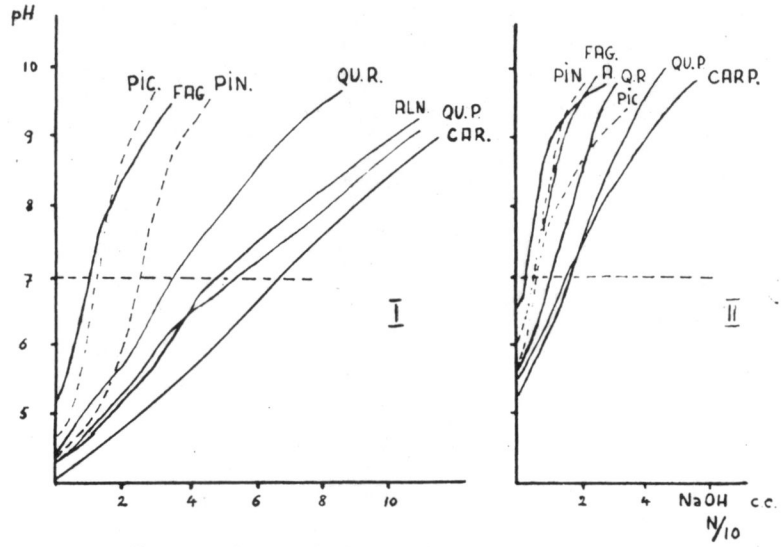


FIG. 7. — Courbes de titration des extraits à l'eau froide.
(I) Litières non décomposées.(II) Les mêmes après 3 mois de décomposition.
Les courbes correspondent aux extraits de 3,33 g de litière dans 300 cc d'eau.

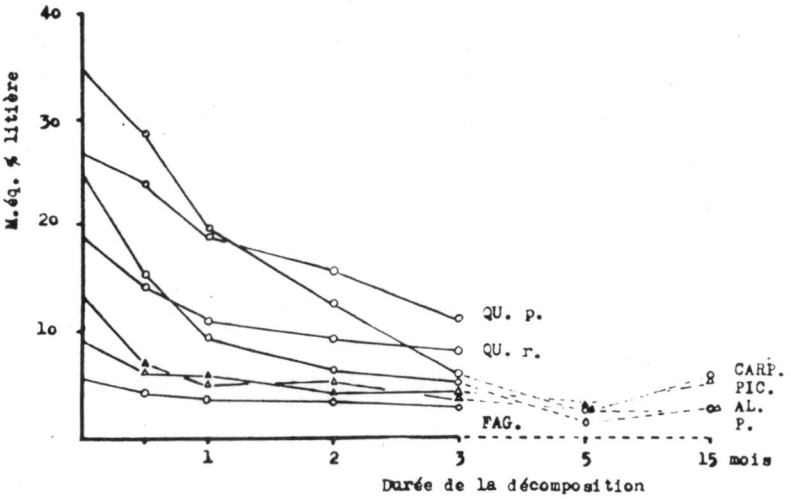


FIG. 8. — Évolution de l'acidité titrable totale au cours de la décomposition.

les deux groupes d'espèces est nettement atténuée. Chez les résineux, la diminution se fait surtout au cours du premier mois de décomposition, puis on assiste à une égalisation des valeurs. En effet, pour les 4 espèces

dont nous avons poursuivi la décomposition jusqu'à 15 mois, les différences entre les valeurs obtenues deviennent faibles après cette période, et peu significatives.

TABLEAU VIII

Évolution de l'acidité titrable des litières au cours de leur décomposition en étuve.

Résultats en méq. p. 100 litière.

Espèces	Durée de décomposition	Extrait froid	Extrait chaud	Extrait total
Charme	0	19,2	15,9	35,1
	15 j.	13,2	15,3	28,5
	1 ms	10,8	8,85	19,65
	2	6,6	5,7	12,3
	3	4,05	1,8	5,85
	5	1,2	1,2	2,4
	15	3,25	2,75	6,0
Aulne	0	14,4	10,8	25,2
	15	7,8	7,5	15,3
	1	4,2	5,25	9,45
	2	2,25	3,9	6,15
	3	2	3,2	5,2
	5	0,3	1,2	1,5
	15	1,75	1	2,75
Chêne péd.	0	15	12	27
	15	12,9	11,1	24
	1	9	10,5	19,5
	2	7,2	8,7	15,9
	3	4,2	6,9	11,1
Chêne rouge	0	9,75	9,45	18,9
	15	6,3	7,8	14,1
	1	4,35	6,45	10,8
	2	3,6	5,7	9,3
	3	2,7	5,4	8,1
Hêtre	0	2,85	2,7	5,55
	15	1,95	2,25	4,2
	1	1,8	1,95	3,75
	2	1,65	1,8	3,45
	3	1,65	1,2	2,85
Épicéa	0	7,5	6	13,5
	15	1,95	4,35	6,3
	1	1,65	4,05	5,7
	2	1,5	2,55	4,05
	3	1,35	3,6	4,95
	5	1,05	1,8	2,85
	15	2,75	3,25	6
Pin	0	7,5	6	13,5
	15	3	3,9	6,9
	1	2,4	3	5,4
	2	1,65	3	4,65
	3	1,65	2,4	4,05
	5	0,9	1,8	2,7
	15	0,75	1,75	2,5

IV. — VITESSE DE DÉCOMPOSITION DES LITIÈRES

Méthodes d'études de la décomposition des litières.

a) AU LABORATOIRE :

Nous avons utilisé la méthode préconisée par BROADFOOT et PIERRE (1939). Des quantités déterminées de litière broyée jusqu'à passage au tamis de 1 mm sont placées dans des cristallisoirs de verre et humectées à l'humidité équivalente. Ce taux d'humidité est proche des conditions optimum et permet en même temps une bonne aération des échantillons qui présentent alors des grumeaux de 2 à 4 mm. Chaque récipient a été inoculé plusieurs fois et à intervalles réguliers pendant toute la durée de la décomposition avec 2 cc d'une suspension dans l'eau distillée d'un mélange d'humus et de litière fraîchement récoltés. Les récipients ont été maintenus à l'étuve à 27-28°, et l'eau perdue par évaporation rajoutée à intervalles réguliers. A la fin des périodes de décomposition, les échantillons ont été séchés et pesés pour la détermination de la perte de poids qui, exprimée pour 100 g de litière sèche, représente le taux de décomposition. Des aliquotes ont été également prélevés pour la détermination du pH, des matières hydrosolubles, etc.

b) SUR LE TERRAIN :

Une certaine quantité de litière correspondant à 150 g de feuilles séchées à l'étuve est disposée dans des cadres de bois de 50 × 50 × 10 cm, dont le fond est constitué par un treillis métallique galvanisé à mailles de 2 mm. Cette quantité correspond à une chute de feuilles de 6 t /ha /an, par conséquent à une quantité sensiblement double de celle observée en moyenne dans les forêts tempérées d'Europe Centrale.

Ces cadres ont été mis en contact intime avec le sol après que celui-ci eut été débarrassé des débris d'anciennes litières et, dans le cas de la station II, des touffes de Molinie. Le tout a été recouvert d'un treillis à mailles plus larges, pour éviter que des apports extérieurs ne viennent perturber les échantillons.

L'expérience, mise en route en automne 1953, a été poursuivie jusqu'en automne 1955. Nous avons effectué deux pesées de ces litières par an : au printemps, vers la mi-avril, et en automne au moment de la chute des feuilles.

Les mesures ont été effectuées avec 5 litières : le Charme (*Carpinus Betulus*), l'Aulne (*Alnus glutinosa*), le Chêne (*Quercus pedunculata*), le Hêtre (*Fagus silvatica*) et le Pin (*Pinus silvestris*), dans 3 stations différentes du Herrenwald, au nord de Strasbourg :

Station I : Charmaie-Frênaie (*Pruneto-Fraxinetum*), sol à mull, pH moyen 4,4.

Station II : Chênaie-Pineraie à Molinie (*Quercetum medio-europaeum molinietosum*), sol à humus brut, pH moyen 3,8.

Station III : Chênaie-Pineraie à Canche (*Quercetum medio-europaeum typicum*), sol à humus brut, pH 3,7.

Résultats :

Les pourcentages de décomposition des feuilles mortes *au laboratoire* après des périodes variables de 1/2, 1, 2, 3 mois et pour certaines espèces de 5 à 15 mois, figurent sur le tableau IX. On s'aperçoit que la perte de poids des échantillons est la plus importante pendant le premier mois de décomposition (fig. 9). Cette période correspond à un développement intense de mycélia de champignons, particulièrement épais chez les espèces riches comme l'Aulne et le Charme, et moins denses chez les Conifères et le Hêtre.

TABLEAU IX

Vitesse de décomposition des litières en étuve à 27-28°.
Perte de poids p. 100 de la litière séchée à 50°.

Essences	Durée de décomposition					
	15 j.	1 ms	2 ms	3 ms	5 ms	15 ms
Aulne	16,3	26,8	30,2	33,7	49,4	68,5
Charme	10,8	17,8	22,7	31,8	48,0	74,3
Chêne péd.	5,0	5,2	10,7	14,2	—	—
Chêne rouge	4.0	10,1	26,7	32,5	—	—
Hêtre	3,2	5,5	8,1	7,7	—	—
Epicéa	3,8	7,7	11,5	14,1	25	46,1
Pin	3,2	2,75	10,1	16,1	37,6	58,2

De grandes différences entre les différentes espèces existent dans les vitesses de décomposition, fait qui a déjà été signalé par de nombreux auteurs (WITTICH, BROADFOOT, JOHNSTON, RICHARD). Après 3 mois certains échantillons ont perdu 30 p. 100 de leur poids initial (Aulne, Chêne rouge, Charme), alors que d'autres comme le Chêne pédonculé, le Pin, l'Épicéa atteignent à peine 15 p. 100. Le Hêtre se décompose le moins bien, puisque la perte en poids sec est inférieure à 10 p. 100. Ces résultats confirment ceux de MATTSON et KOUTLER-ANDERSSON qui constatent par des essais de laboratoire que le Chêne et surtout le Hêtre, se décomposent très lentement. Il en est d'ailleurs de même du Hêtre américain, *Fagus grandiflora*, qui, dans les essais de BROADFOOT et PIERRE (1939) se distingue par le taux de décomposition le plus bas parmi un lot de 19 espèces, résineux compris.

Il est intéressant de comparer ces chiffres avec les résultats obtenus sur *le terrain*. WITTICH (1943) donne l'ordre suivant pour les vitesses

de décomposition décroissantes : Orme, Aulne, Frêne, Robinier, Charme, Chêne, Bouleau, Hêtre. De même AALTONEN (1932) a pu mettre en évidence la très mauvaise décomposition du Hêtre.

Les résultats de nos expériences personnelles, effectuées de 1953 à 1955 en Forêt du Herrenwald, figurent sur le tableau X. On voit que dans les 3 stations, et conformément aux résultats du laboratoire, ce sont encore le Charme et l'Aulne qui se décomposent le mieux, tandis que les feuilles de Hêtre sont, parmi les litières étudiées, celles qui résistent le mieux à la décomposition. Le Pin présente des valeurs singulièrement élevées. Il est possible que ces chiffres soient légèrement exagérés par

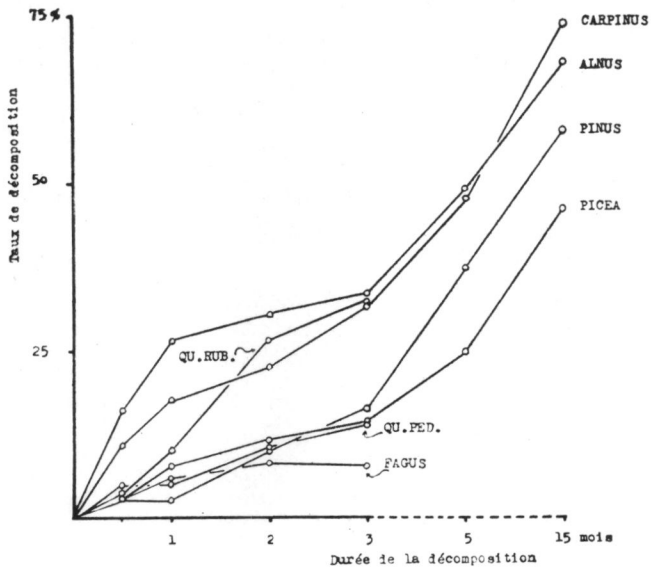


FIG. 9. — Vitesse de décomposition des litières en étuve à 27-28°.

suite de pertes de matériel dues à la finesse des aiguilles de Pin qui arrivent à traverser les mailles du treillis, malgré les précautions que nous avons prises. C'est sans doute là aussi la raison pour laquelle on ne trouve pas dans la littérature des données expérimentales sur la décomposition des résineux dans le milieu naturel.

Notons que, pour l'ensemble des espèces étudiées, la plus grande perte de poids par unité de temps a lieu pendant la première année de la décomposition et surtout pendant le premier hiver. Il est vraisemblable que les substances hydrosolubles sont rapidement lessivées et que les osides simples subissent une dégradation rapide.

Nous avons enfin observé des différences dans le taux de décomposition d'une même espèce selon les types de forêt : la décomposition est la meilleure sur le mull du *Pruneto-Fraxinetum*, où l'activité microbiolo-

gique est la plus élevée, et la plus mauvaise sur le moder fibreux de la Chênaie-Pineraie à canche, où cette activité est la plus faible. Dans la forêt du plateau suisse, RICHARD (1945) avait de même constaté une vitesse de décomposition décroissante avec l'acidité de l'humus, dans trois associations.

TABLEAU X

Vitesse de décomposition de différentes litières dans les conditions naturelles.

Essences	Stations	Taux de décomposition % de litière initiale sèche			
		Printemps 1954	Automne 1954	Printemps 1955	Automne 1955
Charme	I	23,1	—	—	—
	II	25,3	45,8	52,9	60,8
	III	22,9	42	44,2	50,8
Aulne	I	32,4	52,8	53,5	55,5
	II	21,3	37,6	46,3	50,6
	III	20	37,8	37	41,2
Chêne péd.	I	10,45	30,3	32,4	36,4
	II	10,1	21,4	25,5	30,8
	III	9,75	23,4	25,6	28,8
Hêtre	I	7,4	11,8	14,2	18,2
	II	7,5	9,9	14,3	17,8
	III	5,3	10,2	8,7	13,5
Pin	I	14,5	31,3	37,1	44
	II	14,6	29,3	36,3	46,2
	III	12,9	26,3	30,5	37,7

V. — RELATIONS ENTRE LA COMPOSITION CHIMIQUE ET LA VITESSE DE DÉCOMPOSITION DES LITIÈRES FORESTIÈRES

Parmi les nombreux facteurs qui peuvent intervenir dans la décomposition des litières forestières, la composition chimique de celles-ci est d'une importance particulière. Aussi a-t-on depuis longtemps cherché à mettre en parallèle ces deux facteurs. Les propriétés des litières les plus souvent étudiées, étaient leur teneur en chaux et leur acidité ; ceci à la suite d'observations sur les différents types d'humus forestiers qui se différenciaient principalement par leur pH. Par la suite, on fit appel à d'autres caractères chimiques. Cependant ROMMEL (1932) a critiqué cette conception essentiellement chimique de la formation des différents types d'humus. D'après sa théorie, les variations observées dans les couches d'humus forestiers ne sont pas dues à des variations du pouvoir de décomposition, mais plutôt à des différences dans le *mode* de décomposition, selon les types de microorganismes qui interviennent. Ainsi on sait que dans les

humus bruts la vie microbienne est dominée par les champignons producteurs d'acides, tandis que dans les mull l'activité fongique est faible et les bactéries jouent un rôle dominant. Les observations de cet auteur paraissent très plausibles ; mais alors comment expliquer les préférences fongiques ou bactériennes ? Il n'y a que deux explications : l'influence des facteurs du milieu (climat et roche-mère), et l'influence de la composition chimique de la matière organique initiale. Il apparaît par conséquent que si la thèse de ROMMEL est valable sur un vaste territoire, il n'en est plus de même sur des surfaces restreintes, où les facteurs du milieu sont constants et où ne joue par conséquent que la composition chimique du peuplement forestier.

Parmi les caractères chimiques susceptibles de présenter une certaine importance dans la vitesse de décomposition des débris végétaux citons : leur richesse en bases, leur acidité, leur rapport C/N qui, s'il est faible, traduit une lignification peu importante des tissus ou une teneur élevée en Azote, leur taux de substances hydrosolubles qui sont des produits facilement assimilables par les microorganismes.

Nos observations montrent que, parmi ces propriétés, cette dernière est la plus importante. En effet, on a vu que le Charme et l'Aulne, extrêmement riches en substances hydrosolubles, se décomposent le plus rapidement, tandis que les résineux et surtout le Hêtre étaient moins actifs. Le Chêne pédonculé constitue cependant une exception. Malgré une teneur élevée en matières solubles, il se décompose assez mal. De telles exceptions sont nombreuses quand on parcourt les travaux des auteurs. Un grand nombre d'entre eux se sont attachés à mettre en évidence pour plusieurs litières le rôle d'un élément donné et ont tenté d'établir des corrélations. Cette conception nous paraît trop simpliste. En effet, les différents facteurs qui peuvent intervenir ne sont pas d'égale importance. Ainsi, par exemple, le rôle du pH, important dans certains cas, peut devenir tout à fait secondaire dans d'autres, si un deuxième facteur vient à varier, ce qui se produit précisément au cours de la décomposition.

Cette façon de voir a été bien comprise par BROADFOOT et PIERRE (1939). Ces auteurs ont établi des corrélations multiples et arrivent ainsi à faire la part des différents facteurs en calculant l'effet des variables indépendantes sur la décomposition, à partie des coefficients partiels standards de régression.

Ils constatent ainsi que pendant les deux premiers mois de la décomposition, les bases n'interviennent pratiquement pas, alors que l'action de l'Azote total, et surtout des matières hydrosolubles, est prépondérante. Calculé sur une période de 6 mois, le rôle respectif de ces trois facteurs, exprimé en pourcentage, est de 19 p. 100 pour les bases, 44 p. 100 pour les matières hydrosolubles et 37 p. 100 pour l'Azote total.

Quoique nos recherches aient été effectuées sur un nombre plus restreint d'échantillons, nous arrivons à des conclusions analogues. Les recherches de corrélations entre la vitesse de décomposition et différentes propriétés chimiques des litières (tableau XI) montrent que le Ca hydrosoluble n'intervient pas pendant les deux premiers mois, que l'Azote est le facteur le plus important pendant la période de 2-6 mois alors que les matières hydrosolubles jouent un rôle pendant toute la durée de la décomposition. On voit que la correspondance avec les résultats de BROADFOOT est remarquable.

TABLEAU XI

	Périodes de		
	0-2 mois	2-6 mois	0-6 mois
Décomposition p. 100 — Ca hydrosoluble	0,198	0,520	0,586
Décomposition p. 100 — N total	0,387	0,766	0,340
Décomposition p. 100 — Matières hydrosolubles	0,613	0,526	0,723

r = 0,664 pour le seuil de probabilité P (x) = 0,05.

Les coefficients de corrélation ont été calculés selon la formule classique :

$$r_{x,y} = \frac{\Sigma(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\Sigma(x - \bar{x})^2 \times \Sigma(y - \bar{y})^2}}$$ (VESSEREAU 1948)

D'autres caractères ont été mis en parallèle avec les vitesses de décomposition, sans que nous ayons calculé le coefficient de corrélation. Ainsi le rapport C/N est faible pour les espèces à bonne décomposition. WITTICH (1943) a fait une observation semblable.

Il n'existe pas de corrélation entre le pH initial des litières et le taux de décomposition. Notons cependant que les résineux et le Hêtre, qui se décomposent mal, ont tendance à s'acidifier pendant la décomposition (fig. 6).

En plus de ces caractères purement chimiques qui peuvent intervenir, doivent jouer également les propriétés texturales des feuilles. Ainsi les feuilles du Hêtre, grâce à leur cuticule cireuse, ainsi que les aiguilles des résineux à cuticule épaisse, sont difficilement mouillables et, par conséquent, moins facilement attaquables par les microorganismes. Le rôle de ces facteurs n'a pas encore été étudié.

CHAPITRE II

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA MOBILISATION DU FER D'UN SOL PAR LES LITIÈRES FORESTIÈRES

I. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les premières expériences de BLOOMFIELD (1952) et de SCHNITZER et DELONG (1952) ont été effectuées dans des conditions assez différentes des conditions naturelles. En effet, le premier auteur a travaillé sur des précipités colloïdaux d'hydroxydes de fer. Les auteurs canadiens ont fait agir des extraits de feuilles mortes sur une colonne de résines synthétiques échangeuses d'ions, sur lesquelles ils avaient fixé préalablement des ions ferriques.

L'influence des facteurs chimiques susceptibles d'intervenir dans les phénomènes de solubilisation du fer dans les sols *en place*, tels la présence d'ions alcalino-terreux ainsi que des colloïdes humiques et argileux, était par conséquent éliminée.

Dans le but de nous rapprocher davantage des conditions naturelles, nos expériences ont été réalisées par percolation de colonnes de terre dans des tubes de verre.

Deux types de sols ont été utilisés :

1° Un horizon B de sol brun lessivé, établi sur le lœss de la Basse-Terrasse et provenant du village de la Souffel au nord de Strasbourg, profil décrit par FRANC DE FERRIÈRE (1937);

2° Un horizon B ferrugineux de sol podzolique, actuellement cultivé, formé sur des alluvions quaternaires siliceuses d'une rivière vosgienne : la Zorn, et prélevé à Stephansfeld. Ce sol a été décrit dans un travail antérieur (LOSSAINT, 1951).

Quelques caractéristiques de ces deux terres figurent sur le tableau n° XII.

L'horizon B du sol brun est très riche en éléments fins inférieurs à 0,002 mm. Sa capacité d'échange est par conséquent très élevée. Néanmoins, grâce à la forte teneur en bases échangeables, le complexe absorbant approche de la saturation, puisque le taux de saturation est de 63,2 p. 100

Par contre, l'horizon B du sol podzolique est très riche en sable grossier. Il est constitué essentiellement de grains de quartz enrobés d'une pellicule de matière fine qui est vraisemblablement de la gœthite (Fe_2O_3, H_2O) minéral qu'on appelait autrefois limonite, mélangée à un peu

d'argile et très peu de limon. L'analyse thermique pondérale de cet échantillon, effectuée en vue de la détermination du type d'oxyde de fer, par les soins du laboratoire de Minéralogie de Strasbourg, n'a pas donné de résultat positif, l'échantillon étant trop pauvre en Fer.

TABLEAU XII

	Horizon B Sol brun lessivé La Souffel	Horizon B Sol podzolique Stephansfeld
Argile (inf. à 0,002 mm)	27,2 % T. S.	10,05 % T. S.
Limon (0,002-0,02 mm)	24,6 —	4,3 —
Sable fin (0,02-0,2 mm)	45,0 —	31,5 —
Sable grossier (0,2-2 mm)	1,0 —	57,1 —
Calcaire ($CaCO_3$)	0 —	0 —
pH dans l'eau	7,6	6,6
Fer libre (Fe_2O_3 %) *	1,96 % T. S.	0,84 % T. S.
Fer total (Fe_2O_3 %) **	4,34 —	1,32 —
Bases échangeables totales (S) (m. éq.)	7,36 —	0,9 —
Capacité d'échange (m. éq.)	11,64 —	2,88 —
Taux de saturation %	63,2	31,2

* Méthode de DEB (1950).
** Méthode de DEMOLON et Leroux (1933).

Méthodes de dosage du fer dans les liquides de percolation :

En raison de l'abondance des matières organiques, les percolats amenés à sec doivent être préalablement minéralisés pour détruire les complexes et éliminer les substances réductrices. Dans ce but les solutions ont été traitées à l'eau régale et à l'eau oxygénée à 20 volumes. Après plusieurs traitements, les solutions sont à nouveau amenées à sec. On ajoute HCl 1/2. Les liqueurs chlorhydriques sont maintenues pendant 12 h sur la plaque chauffante pour insolubiliser la silice. On reprend à HCl, puis on procède au dosage.

Lorsqu'il y avait suffisamment de fer en présence, nous avons utilisé une *méthode oxydimétrique* (CHARLOT et BEZIER, 1949). 10 cc de solution sont placés dans un bécher en présence de 10 cc de HCl 6 N (1/2). On chauffe au voisinage de l'ébullition. Puis on ajoute goutte à goutte une solution de chlorure stanneux, de préférence fraîchement préparée, jusqu'à disparition de la coloration jaune du complexe ferri-chlorhydrique. Ajouter une goutte en excès. Cet excès est réoxydé en chlorure stannique avec du chlorure mercurique après refroidissement. Il se forme alors Hg_2Cl_2 qui précipite. A présent tout le fer est à l'état ferreux. Il suffit de le doser par oxydation avec une solution N/20 ou N/50 de $Cr_2O_7K_2$ en présence d'un indicateur d'oxydo-réduction, le diphénylamine-sulfonate de barium : 1 cc bichromate N/50 = 1,116 mg de Fer.

Lorsque les solutions étaient peu riches en Fer, ce dernier a été dosé par *la méthode colorimétrique* au sulfocyanure de potassium. Les mesures ont été effectuées au colorimètre Weka, à deux cellules photoélectriques montées en opposition. Le maximum d'absorption de la lumière se situant aux environs de la longueur d'onde, 5 000 Å, nous avons utilisé un filtre vert (LANGE, 1941).

Expériences de solubilisation du fer :

Les expériences de solubilisation du fer ont été réalisées dans des conditions variées, mais elles peuvent être ramenées à deux types d'essais :

1° **Influence directe des litières** au cours de leur décomposition par percolation avec de l'eau distillée. Les colonnes de terre comportent à leur partie supérieure une couche de feuilles mortes finement broyées. Ces dernières libèrent au cours de leur décomposition des substances qui sont entraînées par les eaux de percolation.

2° **Influence des extraits de feuilles**. Dans ce cas, les substances hydrosolubles extraites après des périodes variables de décomposition sont mises en contact avec la terre pendant un certain temps, soit par percolation en colonne, soit par agitation des solutions avec les échantillons de sols.

II. — EFFET DIRECT DES LITIÈRES EN COURS DE DÉCOMPOSITION

1° Expériences préliminaires. Mise en évidence qualitative du phénomène.

Les premières expériences ont été réalisées de la façon suivante :

Des tubes de verre de 3,5 cm de diamètre et de 27 cm de hauteur, fermés à leur base par un bouchon de caoutchouc muni d'un tube de verre, sont remplis dans leur partie inférieure par les couches successives décrites dans la légende de la Fig. 10.

La zone constituée par des billes de verre a été reliée à l'extérieur avec des tubes de verre fins, afin de permettre une parfaite aération grâce à un courant d'air lent, réalisé avec une trompe à eau. Ces colonnes sont percolées pendant 50 jours avec de l'eau distillée, à raison d'environ 10 cc tous les deux jours. Pendant les premiers jours, le liquide percolé est remis à la surface des tubes pour éviter une trop grande déperdition de substances nutritives avant l'installation de la fermentation, comme le conseille

BETREMIEUX (1951). Notons que par suite du tassement variable du matériel, l'écoulement des solutions ne s'est pas fait à la même vitesse dans les différents tubes, mais que la quantité de liquide ayant percolé était identique pour tous (env. 300 cc).

Après l'expérience, les colonnes ne présentaient que des zones de dépôt peu nettes ; ce n'est qu'après séchage à l'air libre que les zones sont apparues telles qu'on les voit sur les photographies 1 et 2. Ces

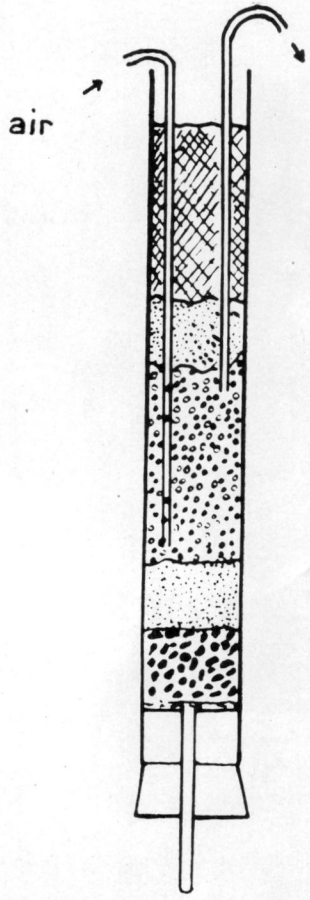


FIG. 10. — Détail du remplissage des tubes. De bas en haut : une couche de gaze ; 3 cm de sable grossier ; 3 cm de sable fin de Fontainebleau lavé aux acides ; 7 cm de billes de verre de 2,5 mm de diamètre ; 3 cm de sable fin.

Ils ont été ensuite remplis, dans leur partie supérieure, par des mélanges divers :

Tube 1 : 40 g de limon.

Tube 2 : 40 g de sable de Fontainebleau + 20 g de litière de Pin en poudre, mélangés.

Tube 3 : 40 g de sable de Fontainebleau + 20 g de litière de Chêne, mélangés.

Tube 4 } 40 g de limon et 20 g respectivement de Pin et
Tube 5 } de Chêne.

Tube 6 : mélange intime de 20 g de sable ferrugineux de Stephansfeld broyé et de 20 g de Pin.

alios en miniature ne se sont formés que dans les tubes contenant du limon ou du sable ferrugineux *en mélange avec de la litière* (tubes 4, 5 et 6) et sont constitués essentiellement d'oxyde de fer, comme l'a montré l'analyse. Ils se déposent immédiatement au contact de la zone aérée. Aucun dépôt ne s'est formé dans les tubes témoins nos 1, 2 et 3.

Cette expérience nous a également renseigné sur les modifications de pH dues à la présence de la terre. Les valeurs relevées pour les 6

percolats, après 15 jours, étaient les suivantes pour les différents tubes :

Tube 1 : 7,6 limon seul
Tube 2 : 4,1 litière de Pin seule
Tube 3 : 3,7 litière de Chêne seule
Tube 4 : 4,5 limon et Pin
Tube 5 : 4,15 limon et Chêne
Tube 6 : 5,2 sable ferrugineux et Pin

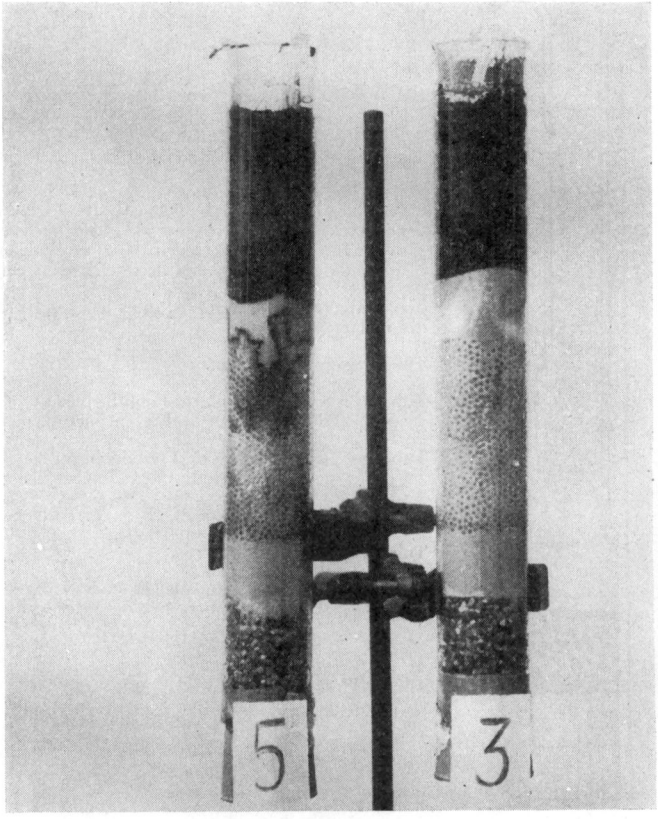


Photo n°1 : Tube n°3, mélange de sable de Fontainebleau et de Chêne. Tube n°5, mélange de limon et de Chêne.

Notons en premier lieu, l'acidification des percolats sous l'influence des différentes litières. Le pH du percolat de limon avec de l'eau distillée (tube 1) est de 7,6 alors qu'en présence de litière (tubes 4 et 5), il s'abaisse à 4,5 et 4,15. Comparés avec les témoins sans limon (tubes 2 et 3), ces chiffres montrent cependant une augmentation de 0,4 par rapport à ces derniers. Cette augmentation est plus importante avec le sable de Stephansfeld : 1,1 unité (comparer tubes 2 et 6).

Il est vraisemblable que par suite de sa pauvreté en argile ce dernier libère plus facilement ses bases qui provoquent une diminution de l'acidité des percolats.

La solubilisation du fer des sols sous l'influence de la décomposition des litières a pu être confirmée par un certain nombre d'autres expériences à caractère quantitatif dont nous citerons les principales.

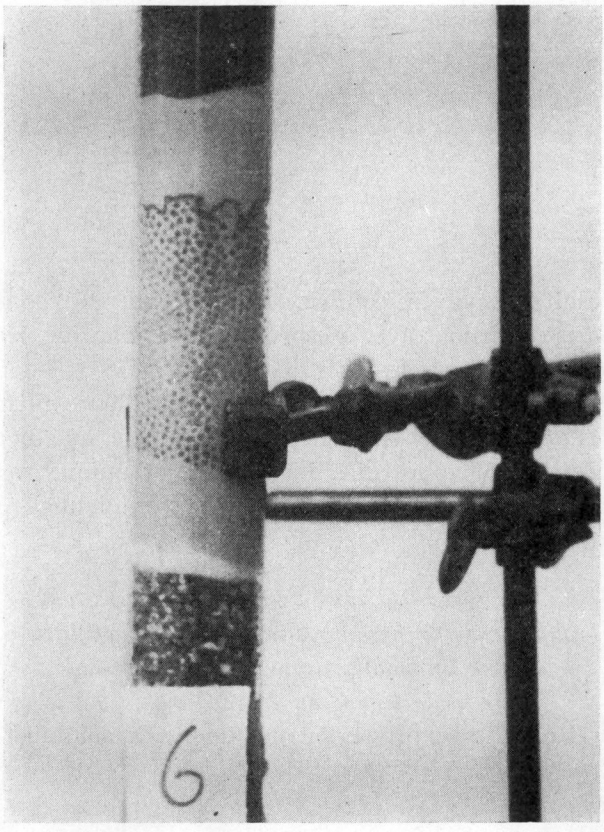


Photo n°2 : Tube n° 6, mélange de sable ferrugineux et de Pin.

2° Étude de l'influence de la nature des litières et de la durée de leur décomposition.

a) Expérience en étuve.

Dans le but d'accélérer les phénomènes de solubilisation du fer, des expériences ont été effectuées en étuve à 30°. Elles étaient aussi destinées à mettre en évidence des différences dans le comportement des litières de différentes essences.

1° Deux tubes de verre contenant 50 g de limon surmonté respecti-

vement de 5 g de *Charme* et de 5 g de *Pin* ont été maintenus pendant 3 mois en étuve à 30° et percolés avec de l'eau distillée. Le fer a été dosé à deux reprises dans les percolats : après 17 jours et après 3 mois.

Dans ces conditions le *Charme libère plus de Fer que le Pin* et cette solubilisation est plus intense au début de la décomposition qu'au bout d'un certain temps (tableau XIII).

TABLEAU XIII

	Fe_2O_3 solubilisé en mg			
	Après 17 jours	Après 3 mois	Total	Total pour 100 g de litière
Charme	13,8	6,78	20,58	411,6
Pin	7,23	3,8	11,03	220,6
Liquide percolé	250 cc	200 cc	450 cc	

2° Ce résultat a pu être confirmé par une autre expérience menée dans les mêmes conditions avec 4 espèces (Aulne, Charme, Hêtre et Pin). La seule différence est que les 50 g de limon ont été mélangés avec 25 g de sable de Fontainebleau pour assurer une meilleure filtration. On a versé tous les deux jours environ et pendant 4 mois, une même quantité d'eau distillée dans chaque tube. La matière organique reste dans ces conditions assez bien aérée. Les quantités de Fer ayant percolé figurent sur le tableau XIV.

TABLEAU XIV

Influence de la décomposition de quelques litières sur la mobilisation du Fer d'un sol de limon en étuve à 30°.
(Résultats exprimés en mg de Fe_2O_3 solubilisé par 100 g de litière.)

Espèces	mg Fe_2O_3
Aulne	276
Charme	392
Hêtre	76,6
Pin	102

Ces valeurs ne représentent évidemment pas la totalité du Fer mis en liberté. En effet, une certaine quantité, bien que déplacée, n'est pas entièrement éluviée, mais reste dans la masse de terre sous forme de taches de rouille qui deviennent particulièrement visibles après séchage de la terre à l'air libre. Ce phénomène rappelle la formation de nodules de sesquioxydes qu'on observe dans tous les sols limoneux acides, provenant du lœss et couverts de forêts. LAMBERTS et LIVENS (1954) les ont décrits en Belgique. Nous-même avons pu les observer à une certaine profondeur

dans les limons acides qui couvrent les dépôts pliocènes rhénans de la partie méridionale de l'Alsace. Ces sols étant dépourvus d'humus brut en surface, on peut admettre que ce sont des lessivats de litières en décomposition qui provoquent cette mobilisation du Fer.

Alors qu'après 3 mois les tubes contenant le Pin et le Hêtre n'ont pratiquement pas changé de couleur, les deux premiers et surtout le Charme, montrent un noircissement de la colonne. Ce phénomène est en rapport avec la plus forte teneur en tanins des deux feuillus, comme nous l'avons vu au chapitre I. Les quantités de Fer libérées sont de trois à quatre fois plus grandes chez ces deux espèces que chez le Pin et le Hêtre, ce dernier présentant la valeur la plus faible.

b) Expérience a la température du laboratoire.

20 g de litière finement broyée sont *mélangés intimement* avec 100 g d'horizon B de podzol et disposés dans des entonnoirs de Büchner dont le fond avait été pourvu au préalable de quelques couches de gaze, d'une couche de sable grossier et d'une couche de sable de Fontainebleau. Six espèces ont été ainsi étudiées : le Charme, l'Aulne, le Chêne pédonculé, le Hêtre, le Pin et l'Épicéa. L'expérience a duré 8 mois, les entonnoirs ayant reçu chacun environ 150 cc d'eau distillée par période de 2 mois ; on voit que, conformément aux expériences précédentes, c'est le Charme qui solubilise le plus de Fer (tabl. 15 et fig. 11). Viennent ensuite l'Aulne et le

Tableau XV

Fe_2O_3 solubilisé par les litières après des durées variables de décomposition en entonnoirs de Büchner à la température du laboratoire.

Résultats exprimés en mg Fe_2O_3 pour 100 g de litière.

Espèces	Durée de décomposition en mois				Total après 8 mois
	2	4	6	8	
Charme	10,6	11,45	4,7	1,95	28,7
Aulne	7,0	3,7	2,2	1,2	14,1
Chêne péd.....	5,6	5,3	4,3	2,7	17,9
Hêtre.....	2,75	3,1	2,6	1,2	9,7
Épicéa	2,6	1,3	2,7	3,0	9,6
Pin.....	1,2	0,5	1,1	0,2	3,0

Chêne. Le Hêtre, l'Épicéa et le Pin se caractérisent par les valeurs les plus faibles. Les trois premières espèces solubilisent plus de Fer au début de leur décomposition que vers la fin, alors que les trois dernières montrent des chiffres plus constants après les différentes périodes. Le pH des percolats se situe dès le premier mois et jusqu'à la fin de l'expérience entre 6 et 7,1, sans qu'on n'observe de différences significatives entre les espèces.

3° Étude de l'influence des conditions d'aération régnant pendant la décomposition.

Beaucoup d'auteurs (BETREMIEUX, 1951 ; JARKOV, 1954, 1956) insistent sur le rôle des conditions d'oxydo-réduction dans la mobilisation du Fer dans les sols, et principalement sur l'intensification de ces phénomènes sous l'influence de l'anaérobiose. Dans le but de préciser cette influence dans le cas des litières, deux séries d'expériences, comprenant chacune 9 espèces, ont été réalisées. Les tubes de percolation ont été montés de la façon habituelle et contiennent chacun 100 g d'horizon B du sol podzo-

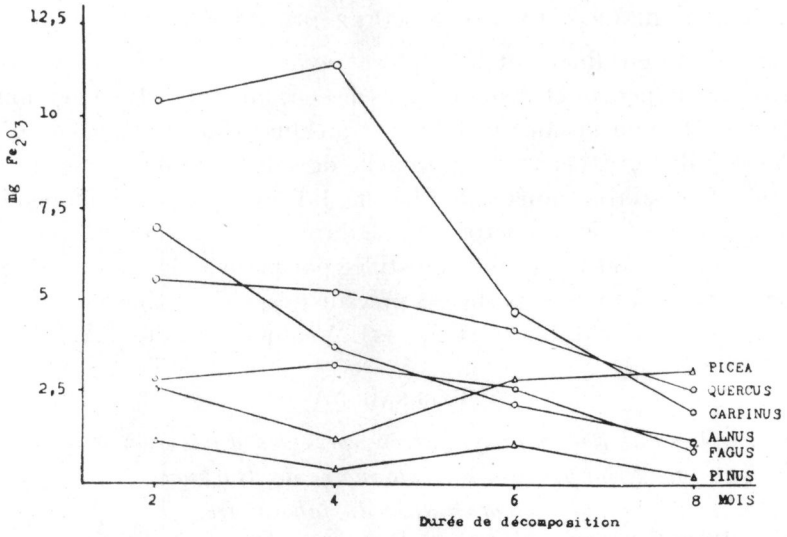


FIG. 11. — Marche de la solubilisation du fer au cours de la décomposition de différentes litières mélangées avec un horizon B de podzol. — Expérience réalisée en milieu aéré, dans des entonnoirs de Büchner.

lique de Stephansfels surmonté de 8 g de litière. Dans la première série, l'eau distillée ajoutée s'est écoulée librement. Une assez bonne aération se trouvait ainsi réalisée. Dans la deuxième série, par contre, la base du tube d'écoulement a été munie d'une pince de Mohr. De cette façon, l'ensemble du matériel a été maintenu constamment submergé. On a procédé à intervalles réguliers à la vidange du liquide et à son remplacement par de l'eau distillée. L'expérience a été réalisée à la température du laboratoire et a duré deux mois. La quantité de liquide ayant percolé est de 300 cc environ par tube. Les résultats figurant sur le tableau XVI et la figure 12, permettent de formuler plusieurs conclusions :

En milieu aéré : Les valeurs obtenues confirment les résultats précédents et permettent de distinguer deux groupes d'espèces : l'Aulne, le

Charme et les deux Chênes à forte action solubilisante d'une part ; le Bouleau, le Hêtre et les trois Conifères très peu actifs d'autre part.

TABLEAU XVI

Étude comparative de la sobulisation du Fer sous l'effet de la décomposition des litières en milieu aérobie et en milieu anaérobie.

Espèces	mg Fe_2O_3 entraîné % g litière		
	Milieu aérobie	Milieu anaérobie	Rapp. $\frac{\text{anaér}}{\text{aér}}$.
Charme	319	883	2,78
Aulne	220	713	3,24
Chêne pédonculé	142	355	2,5
Chêne rouge	157	384	2,44
Bouleau	62	114	1,84
Hêtre	47	perdu	—
Épicéa	62	428	6,9
Pin	51	258	5,06
Sapin	59	535	9,06

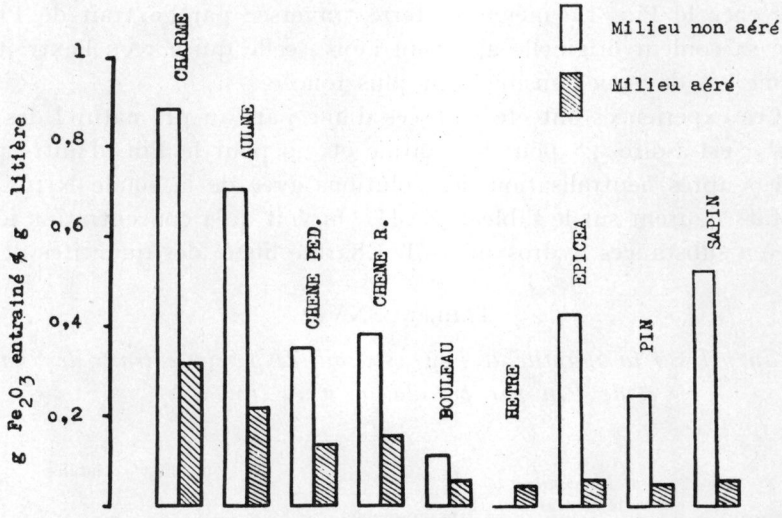


FIG. 12. — Étude comparative de la solubilisation du fer sous l'effet de la décomposition des litières en milieu aérobie et en milieu anaérobie.

En milieu submergé : Pour toutes les espèces, la solubilisation est plus intense en milieu anaérobie qu'en milieu aéré. Les causes peuvent être variées. Nous les discuterons au chapitre III.

Le rapport entre le Fer solubilisé en milieu anaérobie et la quantité entraînée en milieu aéré, se montre particulièrement élevé chez les trois Conifères : alors que chez les feuillus, il se situe entre 1,8 et 3,2, il est de

5 à 9 chez les Résineux. Cette observation semble indiquer que pour ces dernières espèces, l'effet de l'anaérobiose sur la mobilisation du Fer serait plus importante que chez les feuillus. Nous reviendrons sur cette question plus loin.

III. — EFFET DES EXTRAITS STÉRILES DE LITIÈRES

1° Expériences par percolation :

100 g de limon (Horizon B de sol brun lessivé) passé au tamis de 2 mm sont disposés dans des tubes de verre de 3,5 cm de diamètre et de 20 cm de hauteur, et percolés de façon continue avec deux litres d'extraits de Charme et de Pin de différentes concentrations. Ces solutions ont été préalablement rendues stériles par addition de quelques gouttes de NaN_3 (azothydrate de soude) pour empêcher l'installation de toute fermentation.

Le sol restait complètement submergé, donc privé d'air grâce au réglage du débit. Chaque expérience a duré un mois. Les percolats étaient toujours de couleur très foncée chez le Charme, alors qu'ils restaient clairs chez le Pin. De même, la terre traversée par l'extrait de Pin a gardé sa couleur originelle après un mois ; celle qui a reçu l'extrait de Charme est devenue sensiblement plus foncée.

Ces expériences ont été réalisées d'une part au pH naturel des extraits, c'est-à-dire 3,8 pour le Charme et 3,9 pour le Pin, d'autre part à pH 7 après neutralisation des solutions avec de la soude N/10. Les résultats figurent sur le tableau XVII. On voit qu'à concentration identique en substances hydrosolubles le Charme libère des quantités de fer

TABLEAU XVII

Rôle du pH sur la quantité de Fe_2O_3 solubilisée par les extraits de Charme et de Pin par percolation d'un limon.

Espèces	Concentration des extraits en g litière par litre	Concentration en subst. hydrosolubles des solutions en g/l	mg Fe_2O_3 solubilisé	
			pH 3,8	pH 7
Charme	12,5	3,45	51,8	17,25
	7,5	2,1	27,3	15,41
	2,5	0,7	2,24	—
	1,0	0,3	2,17	—
Pin	25,55	3,55	17,3	4,7
	15	2,15	3,24	1,74
	5	0,7	1,98	—
	2	0,3	1,12	—

plus importantes que le Pin aux différentes concentrations utilisées. Cette différence serait encore accentuée, si on exprimait les résultats pour 100 g de litière.

A pH 7 les différences entre les deux espèces subsistent, mais les quantités de fer dissoutes sont moindres, sans qu'elles deviennent cependant nulles. Il ne fait par conséquent aucun doute que *l'acidité des litières et de leurs extraits joue un grand rôle dans la mobilisation du fer.* Cette constatation confirme les résultats de BLOOMFIELD et fera l'objet d'une étude plus détaillée au chapitre suivant.

2° Expériences par agitation :

Dans les expériences précédentes, tout le fer mis en solution par les litières en décomposition, n'a pu être récupéré. En effet, une fraction plus ou moins importante de celui-ci reprécipite au contact de l'air, soit sur les couches de sable de quartz ou de gaze disposées à la base des colonnes, soit sur la paroi intérieure des tubes d'écoulement.

D'autre part, dans les expériences de percolation, le tassement variable des terres dans les tubes, la prolifération des mycelia de champignons, etc., étaient autant de facteurs susceptibles d'accélérer ou de ralentir l'écoulement des solutions et par suite d'influencer l'intensité de la solubilisation.

Pour toutes ces raisons, et par ailleurs pour simplifier les manipulations, nous avons utilisé par la suite une autre méthode qui s'est avérée meilleure et qui nous a fourni des chiffres plus reproductibles, condition absolument nécessaire pour étudier le mode d'action des extraits par l'établissement de corrélations. Au lieu d'être percolés à travers des colonnes, les extraits ont été directement mis en contact avec la terre et agités pendant un certain temps.

Ainsi, dans une expérience préliminaire, un extrait de 4 g de feuilles de Charme et de Pin à 2 p. 100 (4 g pour 200 cc d'eau) a été mis en contact pendant 5 jours avec 50 g de limon. Après cette période, le liquide a été soigneusement centrifugé jusqu'à obtention d'un liquide parfaitement limpide. Dans ces conditions, l'extrait à froid de 100 g de litière de Charme arrive à dissoudre 48 mg de Fe_2O_3, celui du Pin 29 mg.

Dans une autre expérience, sept espèces ont été étudiées, tant en ce qui concerne l'activité des extraits de litières fraîches que des extraits de litières décomposées. La décomposition a été menée jusqu'à trois mois pour l'ensemble des 7 litières et jusqu'à 15 mois avec quatre d'entre elles.

Les feuilles broyées selon la façon habituelle ont été mises à décomposer dans de grands cristallisoirs, en étuve à 27°, pendant des durées variables. Ces expériences de décomposition ont été mises en route de

telle façon que les séries de décomposition de 15 jours, 1, 2 et 3 mois ont pu être arrêtées en même temps, ceci pour garantir au maximum une identité de manipulation pour une même espèce. A la fin des périodes prévues, les opérations suivantes ont été effectuées : prélèvement d'un échantillon pour la détermination de l'humidité, calcul de la perte de poids sec des échantillons, dosage des matières hydrosolubles par évaporation à sec et pesée, dosage de l'acidité titrable, etc.

Les extraits ont été obtenus par macération pendant 24 h à l'eau froide et 24 h à l'eau chaude d'une quantité de substance finement broyée, telle qu'on obtienne des solutions ayant une concentration de 1,83 g de

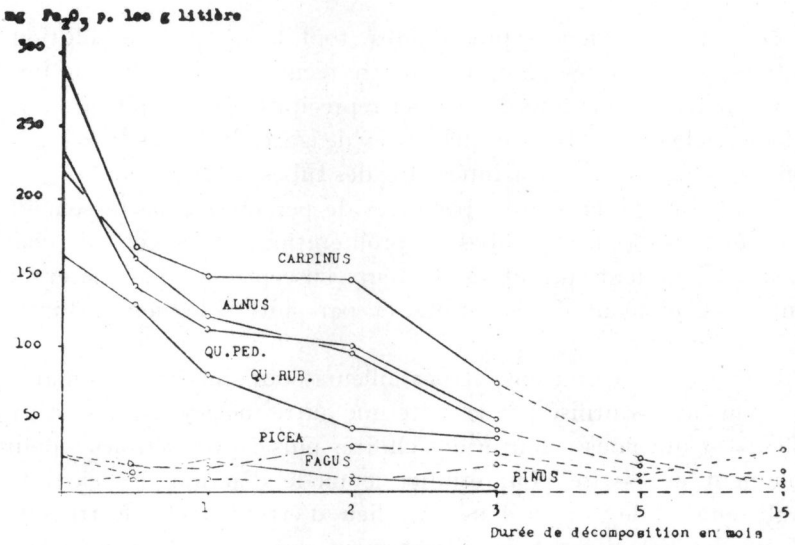


FIG. 13. — Solubilisation du sesquioxyde de fer d'un horizon B de sol podzolique par les extraits totaux de litières en cours de décomposition.

substances hydrosolubles pour 300 cc d'eau distillée. Pour éviter toute fermentation au sein du liquide, on lui a ajouté de l'azothydrate de soude (NaN_3).

Les solutions ainsi obtenues ont été mises en contact pendant 10 jours avec 100 g de sable ferrugineux décrit plus haut. Les extraits, en contact avec la terre, ont été agités périodiquement puis centrifugés à 3 500 tours jusqu'à obtention de solutions parfaitement limpides.

a) ACTION DES EXTRAITS DE LITIÈRES FRAICHES :

On voit sur le tableau XVIII que dans ces conditions des quantités variables de fer sont solubilisées par les extraits des différentes litières étudiées. Comme dans les expériences précédentes — décomposition

in situ —, ce sont les feuillus : Charme, Aulne, Chêne pédonculé et Chêne rouge qui solubilisent le plus de fer, alors que le Hêtre se range avec les résineux qui se caractérisent par une action solubilisante beaucoup moindre.

TABLEAU XVIII

Solubilisation du fer par les extraits aqueux de litières fraîches et décomposées

Résultats en mg Fe_2O_3 p. 100 litière.

Essences	Durée de décomposition	Extrait froid	Extrait chaud	Extrait total
Charme	0	119,6	174,6	294,2
	15 j	45,5	120,5	166
	1 ms	59,7	87,1	146,8
	2	46	99	145
	3	39	35,5	74,5
	5	11,9	10,7	22,6
	15	1,3	2,2	3,5
Aulne	0	98,5	123,5	222
	15 j	72,2	88,8	161
	1 ms	41,4	78,6	120
	2	35,1	61,9	97
	3	14,3	24,7	39
	5	8,45	9,45	17,9
	15	1,15	5,0	6,15
Chêne péd.	0	134	104	238
	15 j	71	70	141
	1 ms	84,7	30	114,7
	2	45,6	53,8	99,4
	3	30,8	17,8	48,6
Chêne rouge	0	101,5	59,7	161,2
	15 j	83,5	44,7	128,2
	1	42,3	36,7	79
	2	20,3	21,5	41,8
	3	20,2	16,9	37,1
Hêtre	0	1,6	6,4	8,0
	15 j	4,4	6,9	11,3
	1 ms	11,2	5,45	16,65
	2	1,5	4,6	6,1
	3	1,1	2,55	3,65
Pin	0	5,3	19,7	25
	15 j	7	1,2	8,2
	1 ms	10,2	5,4	15,6
	2	7,35	4,95	12,3
	3	7,9	7,9	15,8
	5	5,2	3,25	8,45
	15	4,4	8,9	13,3
Épicéa	0	4,7	20	24,7
	15 j	4,7	13,3	18
	1 ms	2,6	14	16,6
	2	18,6	13	31,6
	3	9,35	17,15	26,4
	5	5,9	6,9	12,8
	15	3,0	26,2	29,2

b) Action des extraits de litières décomposées :

Les extraits obtenus avec les litières décomposées perdent rapidement de leur activité (tableau XVIII et fig. 13) tandis que celle du Pin, de l'Épicéa, du Hêtre reste constante ou augmente même légèrement. Le Charme, qui possède la plus grande activité initiale, garde toujours la valeur la plus élevée jusqu'au 5e mois ; ce n'est qu'après le 15e mois qu'il présente avec l'Aulne un taux de solubilisation inférieur à celui du Pin et de l'Épicéa.

(à suivre)

631. 432. 3 : 631. 411. 6 (44)

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA DYNAMIQUE DE L'EAU ET DES SUBSTANCES CHIMIQUES DANS LES SOLS ARGILO-CALCAIRES DE LIMAGNE

Résultats de quatre années d'observations lysimétriques.

PAR

D. COLLIER et M. ROBELIN (1).

Station d'Agronomie, Clermont-Ferrand.

PLAN DU MÉMOIRE

Introduction.

I. — L'eau.

A. — Méthode d'établissement des bilans.
B. — Dynamique de l'eau.
1. — En cases « lysimétriques ».
2. — Influence des fumures organiques.
3. — Influence des conditions de profil.
4. — Influence des irrigations.
C. — Évapotranspiration et rendements.
1. — Bilan 1955-56.
2. — Bilan 1957.
3. — Interprétation.
4. — Sensibilité comparée des plantes étudiées au déficit d'évapotranspiration.
D. — Évapotranspiration par unité de poids de matière sèche.

II. — Les substances chimiques.

A. — Méthodes analytiques.
B. — Composition et exportation des eaux de drainage.
C. — Influence des fumures organiques.
D. — Influence des cultures.
E. — Comparaison avec les résultats ysimétriques de Versailles.
F. — Influence du profil de sol.
1. — Variation de la profondeur du sol sur substratum perméable à très faible capacité de rétention en eau.
2. — Nature du substratum.
3. — Nappe aquifère et arrosages.

Résumé et conclusions.

(1) Avec la collaboration technique de Mlle R. DOPARIS.

A la demande de la Rédaction, les tableaux présentant les données mensuelles ou trimestrielles, bases de ce travail, ont été supprimés ou réduits ; nous les tenons à la disposition du lecteur qui en ferait la demande.

INTRODUCTION

Les cases de végétation, dont la Station d'Agronomie de Clermont a été dotée en 1951, furent conçues dans un double but : d'une part l'étude des aptitudes culturales des sols argilo-calcaires de Limagne donnant matière chaque année à un compte rendu à l'Académie d'Agriculture (1) ; d'autre part celle des caractéristiques lysimétriques de ces mêmes sols qui font l'objet de la présente communication.

L'installation et la mise en service ont déjà été décrites (2). Toutefois on rappellera brièvement ici les caractéristiques des cases. Ce sont des cuves en ciment armé de 2 m² de surface sur 1,60 m de profondeur. Au nombre de 24, elles sont alignées sur deux rangs séparés par un couloir où s'effectue le recueil des eaux de drainage.

Au début de 1952 les cases ont été chargées suivant les dispositions de profil indiquées par le schéma ci-joint (tableau I), puis pour activer le tassement, remplies d'eau jusqu'à 30 cm de la surface du sol pendant une semaine.

TABLEAU I.

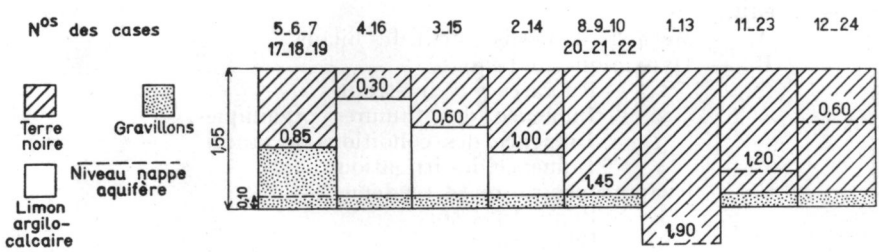


Schéma du dispositif expérimental.

Les sols de la Limagne argilo-calcaire diffèrent surtout entre eux par leur profondeur, la nature de leur substratum et la profondeur de la nappe phréatique. On voit donc que le choix des profils a été dirigé en vue de l'étude du rôle de ces facteurs.

Le sol est une terre noire ayant pour origine le domaine du C. R. A. à Crouelle. Les gravillons (20-25 mm) proviennent des alluvions granitiques de la Dore. Les limons argilo-calcaires ont été extraits du substratum du domaine du C. R. A. à Mon désir. La constitution physique et chimique de ces matériaux est donnée au tableau II.

Les six cases 5, 6, 7, 17, 18 et 19 étaient primitivement seules destinées à l'étude lysimétrique suivant une méthode analogue à celle appliquée à Versailles par MM. DEMOLON et BASTISSE. En conséquence on a réduit la profondeur du sol à 0,85 m pour permettre le drainage annuel

Tableau II.

Constitution physique et chimique des matériaux de chargement des cases (0/00 de terre fine sèche)

	Analyse granulométrique							Humidité équivalente	Point flétrissement	Densité apparente	Analyse chimique						
	Cailloux et graviers 0/00 de terre brute	Sables grossiers	Sables fins	Limon	Argile	Calcaire	Mat. org. totale				C	N	P_2O_5 Dyer	K_2O M. B.	K_2O échangeable	Na_2O échangeable	MgO échangeable
Sol	57,5	138,5	134	176	405	74	42	360	220	1,10	24,6	2,17	1,37	0,18	1,01	0,08	0,81
Sous-sol	38,5	126	149	170	411	84	29	360	220	1,10	17,1	1,53	1,47	0,14	0,69	0,125	0,89
Substratum limon argilo-calcaire...	246	173	48	121	178	417	11	360	200	1,25	6,6	—	1,13	0,12	0,30	—	—

des cases cultivées et maintenu les cases 6, 17 et 19 en jachère travaillée. Seules ces eaux de drainage furent analysées.

Avant sa mise en place la terre des cases avait reçu du fumier. Depuis il n'en fut appliqué qu'en décembre 1954 sauf sur les cases 6-18 recevant chaque année les résidus des récoltes précédentes (paille des céréales, feuilles des plantes racines) et 7-19 réservées comme témoins. Aucun engrais minéral n'a été appliqué pendant toute la durée de l'expérience, si ce n'est un épandage d'ammonitrate effectué en novembre 1955, une case sur deux, à l'exception des 6 cases dites lysimétriques.

Les cultures pratiquées ont été les suivantes :

Années	Plantes cultivées	Semis	Récolte
1952.....	Carottes blanches à collet vert	17-18 avril	22-25 octobre
1952-53	Blé d'hiver « Magdalena »	12-14 novembre	29 juillet
1953-54	Orge d'hiver « Probstdorf »	30 octobre	2-21 juillet
1955.....	Betterave sucrière « Bourdon »	-14 avril	2 novembre
1956.....	Orge de printemps « Rika » (1)	14 mars	25-27 juillet
1957.....	Maïs « I.N.R.A. 244 »	3 mai	25 oct.-11 nov.

I. — L'EAU

A. — MÉTHODES D'ÉTABLISSEMENT DES BILANS

Quelques définitions.

Bilan de l'eau : Répartition des apports d'eau par la pluie (P) et les irrigations (I) entre une fraction évaporée (E) et une fraction éliminée par drainage (D), durant une période déterminée :

$$P + I = E + D$$

chacun des termes de l'équation étant exprimé en hauteur d'eau (mm). P, I, D sont mesurés, E est calculé par différence.

Évaporation et Évapotranspiration : On parlera d'évaporation dans le cas d'un sol nu, d'évapotranspiration dans le cas d'un sol cultivé.

Évapotranspiration potentielle (*Ep*) : C'est l'évapotranspiration qui s'établit lorsque l'eau à la disposition du couvert végétal n'est plus un facteur limitant. Ep représente le besoin en eau maximum d'une surface cultivée dans les conditions climatiques imposées. Son évaluation nous est fournie par l'évapotranspiration sur les cases 12-24 à plan d'eau proche de la surface.

Établissement des bilans.

L'établissement d'un bilan demande la connaissance de l'état initial et de l'état final du système étudié. Pour le bilan de l'eau en case de végétation un seul état est définissable, celui de saturation du

(1) En remplacement d'un blé d'hiver gelé.

TABLEAU III. — *Bilans annuels*

		Sol nu			Sol cultivé												
Cases n°		19	6	17	7	18	5	4-16	3-15	2-14	8-20	9	21	10	22	11-23	12-24
Pluies et irrigations	1954	658,5	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	—	—
	1955	486,8	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	569,8	571,8	697,8	585,8	—	—
P + I	1956	635,8	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	—	—
(1)	1957-58	682,5	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	730,0	730,0	730,0	730,0	—	—
(2)	1957	484,3	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	d°	531,8	531,8	531,8	531,8	—	—
Drainages	1954	263,8	279,4	274,6	98,5	99,0	103,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D.	1955	147,4	157,7	154,4	102,4	117,1	113,1	57,1	51,3	31,7	25,5	36,9	39,0	38,7	30,3	36,3	50,1
(1)	1956	302,8	312,4	310,0												123,7	177,8
	1957-58	272,2	313,4	285,0	187,9	203,6	183,1	143,2	144,6	118,8	125,8	154,4		157,0		237,7	270,0
Évaporation et évapotranspiration	1954	394,7	379,2	383,9	560,0	559,5	554,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1955	339,4	329,1	332,4	1 021,2	1 005,5	1 009,5	1 065,5	1 071,3	1 090,9	1 097,1	1 168,7	1 168,6	1 294,9	1 191,3	637,4	664,6
	1956	333,0	323,4	325,8												615,3	599,9
P + I — D. (1)	1957-58	410,3	369,1	397,5	494,6	478,9	499,4	539,3	537,9	563,7	556,7	575,6		573,0		598,0	637,0
(2)	1957	300,4	283,3	298,9	394,5	378,8	399,3	439,2	437,8	463,6	456,6	475,5		472,9		497,9	536,9
Moyennes sur 4 ans		341,8	328,7	335,2	493,9	485,9	490,9										
Moyennes sur 3 ans		324,2	311,9	319,0	471,9	461,4	469,4	501,5	503,0	518,1	517,9	548,0	548,0	589,2	554,7	583,5	600,5
E % (P + I)	1954	59,9	57,6	58,3	85,1	85,0	84,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1955	69,7	67,6	68,4	91,0	89,6	89,9	94,9	95,4	97,2	97,6	97,0	96,8	97,1	97,5	—	—
	1956	52,4	50,9	51,2													
(2)	1957	62,0	58,6	61,7	81,5	78,3	82,4	90,7	90,5	95,6	94,4	89,4		88,9		—	—
Sur 4 ans		60,4	58,1	59,2	87,2	85,7	86,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sur 3 ans		60,6	58,3	59,6	88,1	86,2	87,6	93,5	94,0	96,8	96,7	—	—	—	—	—	—
E % Ep (12-24)	1955	51,1	49,5	50,0	80,8	79,5	79,8	84,3	84,8	86,3	86,8	92,4	92,4	102,4	94,2	99,0	100,0
	1956	55,5	53,9	54,3													
(2)	1957	56,0	52,8	55,7	73,4	70,5	74,3	81,8	81,5	86,3	85,0	88,5		88,7		92,7	100,0
Sur 3 ans		54,0	51,9	53,1	78,6	76,9	78,2	83,6	83,8	86,3	86,3	91,3	91,3	98,2	92,4	97,2	100,0
E — E*n* (17)	1955-57	—	—	—	—	—	150,6	182,5	184,7	199,1	198,8	—	—	—	—	—	—
(E — En) % E*n*	1955-57	—	—	—	—	—	47,2	57,2	57,8	62,5	62,3	—	—	—	—	—	—

(1) Valeurs données par le bilan de mars 1957 à mai 1958.
(2) Valeurs données par le bilan ajusté mars 1957 à février 1958.

sol, atteint lorsqu'un excès d'eau est évacué par drainage. Les bilans ne pourront donc être faits que pour un laps de temps situé entre deux drainages. Les cases en jachère où le desséchement reste superficiel sont saturées rapidement ; ainsi le meilleur critère d'appréciation de la saturation, pour les cases cultivées, est l'obtention d'un drainage journalier égal à celui des cases nues ; on est alors certain de leur identité d'état.

Les drainages généralisés ne se sont produits que trois fois en cinq ans : de février à mai 1955, de février à juillet 1957 et en juin 1958 ; nous ne pouvons donc établir que deux bilans pour l'ensemble du dispositif :

le premier s'étendra de mars 1955 à février 1957 (inclus) ;

le second de mars 1957 à mai 1958.

On peut ajouter avec circonspection, pour les cases lysimétriques cultivées (7-5-18) un bilan allant de mars 1954 à février 1955.

Dans le cas des cases en jachère ou des cases cultivées possédant un plan d'eau l'état de saturation est atteint plus facilement et plus fréquemment, les bilans annuels sont possibles ; nous les avons fixés par raison d'analogie du mois de mars au mois de février suivant.

Ajustement de bilans partiels.

L'expérience montre que durant les périodes intervégétation ou de faible végétation en saisons froides la consommation d'eau sur la nappe phréatique est nulle. L'évaporation qui se produit alors uniquement à partir des précipitations est identique pour tous les éléments du dispositif expérimental soumis aux mêmes conditions météorologiques. Cette évaporation peut être mesurée à chaque instant sur les cases 12-24 par les bilans P-D = E, car la faible épaisseur de sol surmontant le plan d'eau est constamment au voisinage de la saturation et les drainages sont ainsi très rapides.

La connaissance de ces données permet de calculer les évaporations durant des périodes plus courtes par différence avec celles des bilans globaux. Nous pouvons calculer ainsi la consommation d'eau pendant la végétation et ajuster le bilan de mars 1957 à mai 1958 à la période précédemment choisie de mars à février.

Précision des données.

Exception faite pour les 6 cases à 0,85 m de sol subissant individuellement des traitements organiques, chaque disposition particulière de profil est réalisée en double. La comparaison des drainages entre répétitions sur deux bilans globaux nous fait penser que l'erreur maximum est de $\pm$ 10 mm autour de la moyenne.

B. — DYNAMIQUE DE L'EAU (tableau III)

1° En cases « lysimétriques ».

a) Cases nues

Malgré le nombre d'années d'observation encore réduit, nous pouvons déjà porter une appréciation sur la répartition de l'eau. Pour une hauteur d'eau incidente moyenne de 566,1 mm, 61 p. 100 soit 341,8 mm pour la case témoin 19 vont à l'évaporation et 39 p. 100 au drainage. Le pourcentage de pluie évaporé varie en fait de 50 à 70 p. 100 ; il est d'autant plus élevé que la pluie est plus faible. En valeur absolue l'évaporation oscillant de 300 à 395 mm est moins soumise aux fluctuations de la pluie que le drainage, variant lui-même de 147 à 303 mm.

Les maxima de drainage mensuel se situent de mai à septembre où l'on trouve également les maxima pluviométriques. Les petites pluies hivernales permettent le drainage par suite de la faiblesse de l'évaporation et les fortes pluies orageuses d'été saturant facilement la couche superficielle desséchée entraînent un drainage d'autant plus important que la pluie est elle-même plus forte. Ceci explique que les drainages ne cessent pratiquement pas tout au long de l'année.

Des contrôles d'humidité par résistomètres (éléments de plâtre de Gély) nous montrent que l'humidité ne varie pratiquement pas dès 40 cm de profondeur. Seule la couche superficielle subit des alternatives de dessiccation et de réhumectation ; ceci fait admettre qu'une variation de l'épaisseur de sol dans ces cases nues serait sans importance pour le drainage global à condition que cette épaisseur soit supérieure à 40 cm.

b) Cases cultivées.

Sous l'influence de la culture l'évapotranspiration atteint 87,1 p. 100 de la pluie en moyenne sur 4 ans. Elle est en augmentation de 147,7 mm soit 45,5 p. 100 par rapport à la case témoin sans culture.

Mais nous verrons plus loin combien ces chiffres sont variables avec les conditions de sous-sol.

2° Influence des traitements organiques.

Le fumier (cases 17-5) et les résidus de récoltes (6-18) entraînent, aussi bien pour les sols en jachère que pour les sols cultivés, une légère diminution de l'évaporation. Cette action est d'autant plus marquée que la fumure organique est plus importante ; elle est sans doute significative en dernière année sur les cases recevant les résidus, après le sixième apport.

On retrouve, ici, un fait déjà signalé par Bastisse et Henin (3).

3° Influence des conditions de profil.

Toutes les comparaisons établies ici concernent des cases recevant la même fumure organique et les résultats moyens sur trois années (1955-56-57).

a) Variation de la profondeur de terre noire

— *Sur gravillons* (comparaison de la case 5 et des cases 8-20) la profondeur de terre noire passant de 0,85 à 1,45 m, l'évapotranspiration annuelle augmente de 469,4 à 517,9 mm, soit un gain de 10,3 p. 100.

— *Sur limon argilo-calcaire* (comparaison des cases 4-16, 3-15, 2-14), la profondeur de terre noire passant de 0,30 à 0,60 et 1 m, l'évapotranspiration passe de 501,5 à 503,0 et 518,1 mm.

Aucune action de la profondeur de terre noire entre 30 et 60 cm ; mais par contre on peut noter une augmentation de l'évapotranspiration lorsque la profondeur atteint 1 m.

Tout accroissement de profondeur de sol entraîne donc une augmentation plus ou moins forte de l'évapotranspiration.

b) Comparaison des deux substratum.

On ne peut pas mettre en parallèle l'action de substratum différents pour une même profondeur de sol. Cependant, en comparant les cases 5 (0,85 de terre noire sur gravillons) et 4-16 (0,30 de terre noire sur limon) on voit l'évapotranspiration croître de 469,4 à 501,5 mm, malgré une profondeur de terre noire plus faible dans le deuxième cas ; d'après les observations précédentes il faut donc admettre une influence particulièrement importante du limon argilo-calcaire. Par conséquent un substratum retenant l'eau augmente l'évapotranspiration.

L'interprétation de ces faits est évidente. Lorsque la pluie pendant la période de végétation est inférieure à l'évapotranspiration potentielle, la plante utilise l'eau exploitable dans les réserves du sol jusqu'à concurrence de cette dernière valeur. L'évapotranspiration réelle sera donc fonction de l'importance du stock utilisable.

On a noté ci-dessous pour chaque groupe de cases la valeur de la capacité de rétention globale et de la hauteur d'eau théoriquement utilisable, calculée à partir de la différence entre l'humidité équivalente et l'humidité au point de flétrissement.

Cases	5	4-16	3-15	2-14	8-20
Stock total à saturation (mm).	322	503	515	530	548
Stock théoriquement utilisable (mm).	124,5	217	216	214	212,5

Les réserves sont pratiquement identiques si l'on fait exception de la case 5 ; cependant les évapotranspirations des groupes 4-16 et 3-15 sont significativement plus faibles à chaque bilan que celles des groupes

2-14 et 8-20. La présence de limon paraît ainsi agir de deux façons ; d'une part elle augmente l'évapotranspiration par rapport aux sols de même épaisseur sur substratum léger (stock d'eau utilisable plus élevé), d'autre part elle freine légèrement l'exploitation du stock par rapport aux sols profonds de réserve en eau voisine ; ce deuxième effet est dû probablement à une limitation du développement racinaire en profondeur. Lorsque le limon se situe à un mètre, cet inconvénient ne se manifeste plus.

L'évapotranspiration annuelle moyenne représente ainsi selon les conditions de profil 87,6 p. 100 à 96,7 p. 100 de la pluie.

De même, puisque la plante sensibilise l'évapotranspiration aux propriétés du sous-sol alors que l'évaporation d'un sol nu en est indépendante (paragraphe 1-*a*), l'influence de la culture se chiffre par un supplément d'évaporation de 150,6 à 199,1 mm par rapport au sol nu, soit 47,2 p. 100 à 62, 5 p. 100.

c) **Comparaison avec les cases lysimétriques de Versailles** (4).

Les moyennes de 4 années dont on dispose actuellement sont sans doute insuffisantes pour définir les valeurs caractéristiques du bilan de l'eau à Clermont. Elles permettent cependant de souligner déjà quelques différences importantes avec les moyennes de Versailles.

	Pluie m/m	Évaporation en sol nu (En) m/m	Évapo-transpiration en sol cultivé (Ec) m/m	Ec-En m/m
	—	—	—	—
Clermont (C) moyenne de 4 ans (0,85 m de terre noire)	566,3	341,8	493,9	152,1
Versailles (V) moyenne de 18 ans (0,60 m de limon)	594,1	381,2	448,1	66,9
C-V	— 27,8	— 39,4	+ 45,8	+ 85,2

Le climat, en particulier une pluviométrie plus régulière, favorise à Versailles l'évaporation du sol nu. Par contre les différences relevées en sol cultivé peuvent s'expliquer, comme on vient de le voir, par le simple jeu des volumes d'eau de réserve. Le stock contenu dans 60 cm de limon est inférieur à celui qui peut s'emmagasiner dans 85 cm de terre noire ; ce dernier est cependant encore très insuffisant pour assurer une évapotranspiration convenable. On est à Versailles dans des conditions de sécheresse édaphique marquées, confirmées par la faiblesse des rendements obtenus.

Une partie importante de l'eau drainée et irrémédiablement perdue pour la plante dans les cases de Versailles est retenue dans celles de Clermont et participe ultérieurement à l'alimentation de la plante en augmentant l'évapotranspiration.

4° Influence des irrigations.

a) Arrosages.

Les essais d'arrosages réalisés portent sur les dates et les volumes d'irrigation en 1955 et les dates en 1957 ((1) 1956-1958). On trouvera ci-dessous leur répartition :

Cases :	8-20	9	21	10	22
Arrosages en 1955 (mm) :					
Du 30/6 au 28/7	0	14	0	14	14
Du 28/7 au 25/8	0	0	85	85	85
Du 25/8 au 22/9	0	0	0	43	0
Du 22/9 au 20/10	0	69	0	69	0
Total	0	83	85	211	99
En 1957 (mm) :					
12 Juillet	0	7,5		0	
23 Juillet	0	22,5		30	
29 Juillet	0	17,5		17,5	
Total	0	47,5		47,5	

Le bilan 1955-56 ne montre aucune différence de drainage significative entre les cases introduites dans l'essai. L'eau d'irrigation fut entièrement évaporée au cours des deux années couvertes par le bilan.

Les traitement de 1957, très semblables, donnent un bilan identique, leur drainage est supérieur de 30 mm environ à celui des cases témoins. L'arrosage de 47,5 mm a donc entraîné une augmentation d'évapotranspiration de 17,5 mm seulement, bien que E (environ 474 mm) soit encore assez loin de Ep (537 mm). Les arrosages de juillet, début d'une période sèche, ont probablement nui à l'utilisation ultérieure des réserves d'humidité situées en profondeur, d'où l'inefficacité apparente d'une part importante de l'irrigation. Ce phénomène n'est pas décelable sur le premier bilan puisqu'une deuxième culture, non irriguée, a pu niveler les différences d'humidité du sous-sol susceptibles d'avoir pris naissance à la suite des arrosages ; cette dernière culture aurait ainsi bénéficié indirectement d'une arrière-action des arrosages. On verra ultérieurement la justification de cette hypothèse.

Quoiqu'il en soit l'irrigation d'un sol de 1,45 m de terre noire, saturé en début d'année, entraîne toujours une augmentation de l'évapotranspiration.

b) Présence d'un plan d'eau.

Un plan d'eau est maintenu artificiellement à 0,60 m de profondeur dans les cases 12-24 et 1,20 m dans les cases 11-23. Dans le bilan P + I — D = E, I représente alors le débit de la nappe phréatique.

En comparant les évapotranspirations relevées annuellement dans chaque cas on voit que les maxima de 1955 et 1957 sont obtenus avec le plan d'eau à 0,60 m, celui de 1956 avec le plan d'eau à 1,20 m ; dans ce dernier cas la différence de 15,4 mm n'est pas significative. Dans les conditions de l'essai, l'évapotranspiration potentielle (Ep) est bien repré-

Tableau IV

Evapotranspirations pendant les périodes de végétation et rendements en matière sèche.

Cases nos	5	4-16	3-15	2-14	8-20	9-(21)	(10-22)	11-23	12-24
E_v mm 1955	680,2	736,2	742,0	761,6	767,8	839,3	—	519,1 | 923,4	546,3 | 935,2
1956								404,3 |	388,9 |
1957	216,8	256,7	255,3	281,1	274,1	293,0	290,4	315,4	354,4
Rendements M. S. (105°) (qx/ha).									
1955 (Betteraves) :									
Racines	69,7	86,4	90,5	98,1	99,0	108,8		123,0	113,1
Feuilles et collets	44,1	57,1	69,7	77,9	69,1	107,0		121,9	82,9
Total	113,8	143,5	160,2	176,0	168,1	215,8		244,9	196,0
1956 (Orge) :									
Grain	43,8	39,8	42,9	43,2	45,5	54,7		55,3	50,1
Paille	48,9	41,4	50,0	49,4	51,1	67,6		85,0	63,4
Total	92,7	81,2	92,9	92,6	96,6	122,3		140,3	113,5
Total 55-56	206,5	224,7	253,1	268,6	264,7	338,1		385,2	309,5
1957 (Maïs) :									
Grain	20,4	41,0	46,5	42,8	45,3	52,5	53,2	68,2	50,5
Paille	35,8	46,4	44,5	51,6	49,9	57,7	53,5	58,4	57,3
Total	56,2	87,4	91,0	94,4	95,2	110,2	106,7	126,6	107,8

sentée par les données des cases 12-24. Sa valeur varie d'une façon importante selon le couvert végétal (en particulier l'époque et la durée de la végétation), et les conditions météorologiques des différentes années (1955 : 664,6 mm ; 1957 : 536,9 mm), autour d'une moyenne de 600 mm par an. L'aptitude de chaque condition de sol à satisfaire cette évapotranspiration maximum caractérise ce que nous pourrions appeler le « potentiel hydrique » du sol ; il peut être chiffré par l'évapotranspiration exprimée en pourcentage de E_p ; ce potentiel hydrique, dans le cas le plus défavorable, est de l'ordre de 78 p. 100 en considérant les moyennes de 3 ans.

C. — ÉVAPOTRANSPIRATION ET RENDEMENTS

Chaque année les récoltes obtenues ont varié du simple au double selon les conditions de sous-sol ou d'irrigation, sans que soit introduite une différenciation chimique quelconque dans l'horizon travaillé. Nous voulons dans ce chapitre, souligner le parallélisme étroit existant entre l'intensité de l'alimentation en eau, chiffrée par l'évapotranspiration, et la production de matière sèche.

Cette étude peut être faite en considérant l'évapotranspiration totale au cours d'un bilan donné ; il est plus logique cependant d'utiliser les valeurs de l'évapotranspiration pendant les périodes de végétation (Ev) ; elles sont obtenues en retranchant des évapotranspirations totales les évaporations hors végétation mesurées sur les cases à plan d'eau élevé, soit 329,3 mm pour le bilan 1955-1957 (118,2 mm en 1955-56 + 211,0 mm en 1956-57) et 282,6 mm pour le bilan 1957-1958. Il s'agit donc d'un simple changement d'origine pour une des variables qui n'entraîne pas de modification de la corrélation.

Les évapotranspirations pendant les périodes de végétation et les rendements en matière sèche en quintaux par hectare sont consignés dans le tableau IV.

1° Bilan 1955 et 1956.

On ne dissocie pas pour l'instant la part de l'évapotranspiration à rattacher à chaque culture ; soulignons simplement l'accroissement des rendements de la betterave avec les conditions d'humidité plus favorables. Pour l'orge on relève un palier des rendements (cases 5, 4-16, 3-15, 2-14, 8-20) correspondant à une reconstitution analogue des stocks d'eau épuisés par la culture de betterave précédente. Elle est égale au drainage des cases 12-24 au cours de la période interculturale soit 51,4 mm. Toutes ces cases présentaient donc une réserve d'eau utile identique.

On relève également une nette augmentation des rendements sur les cases irriguées.

Aussi bien pour la betterave que pour l'orge et, nous le verrons plus loin, pour le maïs cultivé en 1957, les rendements sur les cases à plan d'eau élevé (12-24) sont inférieurs à ceux obtenus par ailleurs dans des conditions de bonne alimentation en eau (11-23).

Les observations culturales et l'analyse minérale révèlent une nette carence azotée du végétal poussant dans ce milieu sursaturé en eau ; la nitrification s'y fait mal et le système radiculaire souffre en ces conditions à tendance anaérobies. Pour ces raisons il ne sera pas tenu compte de cet élément du dispositif dans la recherche des corrélations.

On remarquera cependant que pour les trois cultures envisagées cet excès d'eau est encore plus favorable à la production de matière sèche qu'un déficit de l'ordre de 100 mm.

Cette restriction faite, il existe entre les deux séries de données E v et matière sèche totale récoltée pendant les deux années, un coefficient de corrélation r = 0,989 indiquant la probabilité d'une covariation très forte. On peut voir effectivement sur le graphique 1 se dessiner une corrélation linéaire serrée sur toute l'étendue d'investigation du dispositif.

L'équation de cette droite de régression est la suivante :

$$R = 277{,}3 + 0{,}773\ (E_v - 778{,}6)$$

ou (1) $$R = 0{,}773\ E_v - 323$$

dans laquelle R exprime le rendement en qx/ha de matière sèche et E_v l'évapotranspiration pendant la période de végétation en mm.

Cette régression est hautement significative $\left(t = \frac{0{,}773}{0{,}064} = 12{,}1\right.$ la table de Fisher donnant $t = 6{,}859$ pour $p = 0{,}001\left.\right)$; il apparaît ainsi dans les limites de l'essai qu'à toute augmentation d'évapotranspiration de 1 mm correspond une augmentation de production en matière sèche de 77 kg/ha en moyenne.

Dissociation des évapotranspirations pendant les cultures en 1955 et 1956.

Du fait de la faiblesse de la reconstitution du stock d'eau après la culture de betterave en 1955 (51,4 mm) quelles que soient les conditions de profil, tous les sols non irrigués disposèrent en 1956 d'un volume d'eau effectivement utilisable par l'orge égal à la pluie pendant cette période plus cette réserve, soit en tout 285,8 + 51,4 = 337,2 mm.

L'évapotranspiration potentielle (404,3 mm) étant largement supérieure à ces disponibilités, on peut estimer qu'elles furent entièrement évaporées en 1956.

BETTERAVE 1955 : On a porté ci-dessous les valeurs de l'évapotrans-

piration sur les cases non irriguées, calculées par différence, et celles mesurées sur les cases à plan d'eau.

Cases n° s	5	4-16	3-15	2-14	8-20	9	11-23
E_v (mm)	343,0	399,0	404,8	424,4	430,6	(483,8 ± 23,8)	519,1

On dispose ainsi de 6 valeurs qui peuvent être comparées aux rendements correspondants.

r = 0,991 indique comme précédemment une excellente corrélation.

La régression est encore une régression linéaire,

$$R = 167{,}8 + 0{,}755\ (E_v - 420{,}5)$$

(2) $$R = 0{,}755\ E_v - 149{,}5 \text{ (graphique 2)}$$

de probabilité très élevée $\left(t = \frac{0{,}755}{0{,}055} = 13{,}7\right.$, la table donnant t = 8,610 pour p = 0,001 et n = 4).

Nous sommes autorisés à calculer la valeur de l'évapotranspiration sur la case arrosée 9 en utilisant cette équation de régression puisque les rendements sont inclus dans les limites entre lesquelles la relation est vérifiée (1).

$$215{,}8 = 0{,}755\ E - 149{,}5$$

d'où $$E = \frac{215{,}8 + 149{,}5}{0{,}755} = 483{,}8 \text{ mm}$$

L'erreur de cette estimation dépend essentiellement de l'erreur sur la mesure des rendements soit ± 18 qx (pour p = 0,05).

E_9 = 483,8 ± 23,8 mm (valeur reportée ci-dessus entre parenthèses).

Les rendements en racine et en feuilles et collets augmentent d'une façon linéaire avec l'évapotranspiration (graphique 1). Les coefficients de régression 0,290 pour les racines et 0,465 pour les résidus sont significativement différents (t = 3,30, la table donnant t = 3,169 pour p = 0,01).

Dans les conditions de l'expérience la carence en eau est moins fortement préjudiciable à la production des racines qu'au rendement en feuilles et collets.

La différence $E_{vg} - E_{v8-20}$ = 53,2 mm représente l'augmentation de la consommation d'eau sous l'effet de l'arrosage de 85 mm.

ORGE 1956 : On ne possède pour cette année culturale que trois valeurs différentes de l'évapotranspiration, une pour les cases non irriguées, une pour la case 9 arrosée superficiellement (par calcul), et enfin une autre pour la case 23 à nappe.

Cases n^{os} :	5 4 15 2 20	9	23
E_v (mm) :	337,2	355,5 ± 23,8	404,3

On ne peut établir de relation que sur un très faible étalement des

(1) Les autres cases arrosées furent différenciées en 1956 par une fumure azotée.

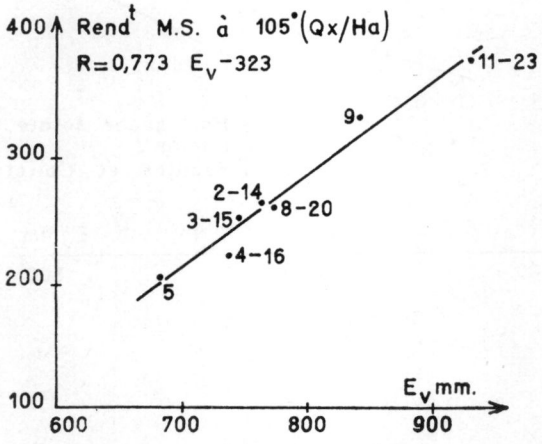
variables. Dans ce petit intervalle on trouve cependant une covariation significative ; la régression s'écrivant :

$$R = 0{,}785\ (E_v - 349{,}1) + 102{,}6$$

(3) $$R = 0{,}785\ E_v - 171{,}3 \text{ (graphique 3)}$$

Un point s'écarte notablement de la droite de régression, c'est le point représentatif de la case 4 — (limon à 30 cm). Il est possible que dans ce profil de sol la réserve de 51 mm n'ait pas pu être utilisée entièrement et que l'évapotranspiration estimée 337,2 soit légèrement fausse par excès. On peut penser aussi à un épuisement chimique dû à la faible profondeur du sol.

Dans l'étendue des évapotranspirations mesurées, c'est surtout la



GRAPHIQUE 1. — Culture 1955 + Culture 1956.

paille qui est affectée par ces faibles déficits, la production de grains est faiblement touchée.

La différence $E_{vg} - E_{v\ 8-20} = 18{,}3$ mm représente l'arrière-action des arrosages de 1955 sur l'évapotranspiration en 1956. Non significative ($p = 0{,}05$) cette différence est cependant en corrélation avec une augmentation de rendement.

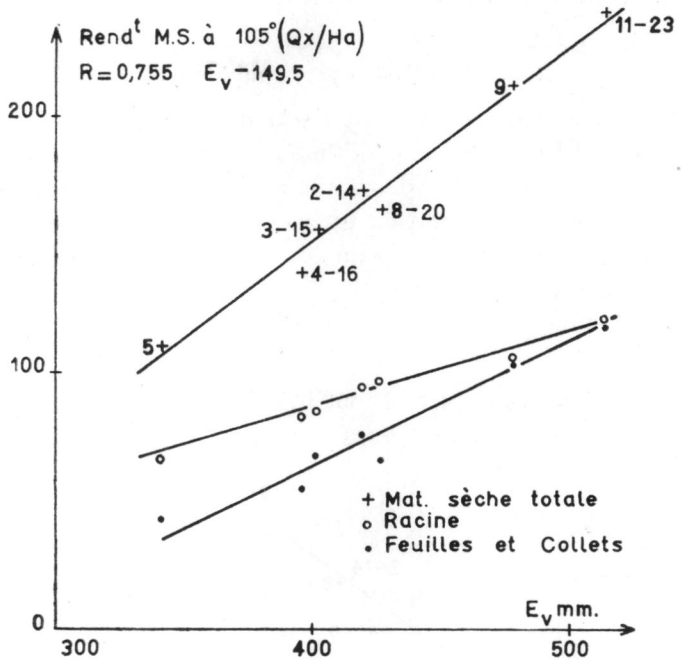
2° Bilan 1957.

On relève encore une corrélation très serrée entre les valeurs de l'évapotranspiration pendant la végétation et la matière sèche récoltée ($r = 0{,}963$). Elle s'exprime dans l'équation de régression :

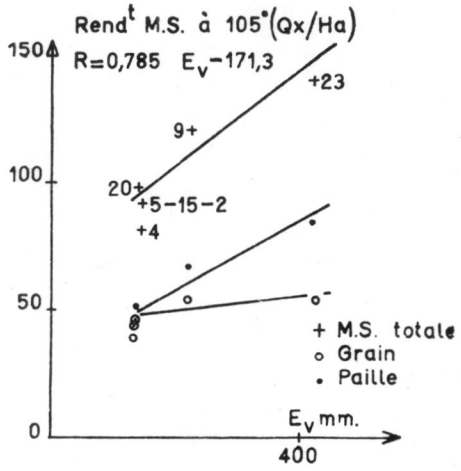
$$R = 0{,}67\ (E_v - 272{,}9) + 96{,}0$$

(4) $$R = 0{,}67\ E_v - 87 \text{ (graphique 4)}$$

($t = 11{,}5 > 5{,}959$ donné par les tables pour $p = 0{,}001$ et $n = 6$).



GRAPHIQUE 2. — Betterave 1955.

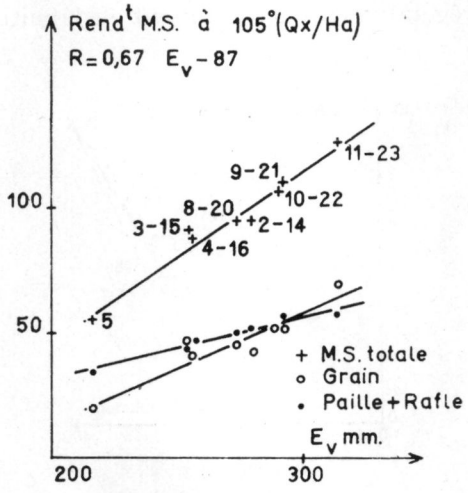


GRAPHIQUE 3. — Orge 1956.

Chaque élément du rendement (paille-grain) varie de même linéairement avec l'évapotranspiration. Ici le grain est nettement plus sensible (coefficient de régression 0,42) que la paille (0,25) à l'alimentation hydrique.

3° Interprétation.

Il est intéressant de constater, sur trois années consécutives et pour des plantes fort différentes, que la production de matière sèche est une fonction linéaire de l'évapotranspiration. Il serait absurde de penser qu'il y a là relation de cause à effet et que la valeur de l'évapotranspiration conditionne directement l'intensité des phénomènes de synthèse ;



GRAPHIQUE 4. — Maïs 1957.

cela reviendrait, en effet, à croire que pour un végétal donné la production est fonction du pouvoir évaporant de l'atmosphère ; on sait combien peut être important le volume de matière végétale obtenu en serres où la consommation d'eau reste très faible.

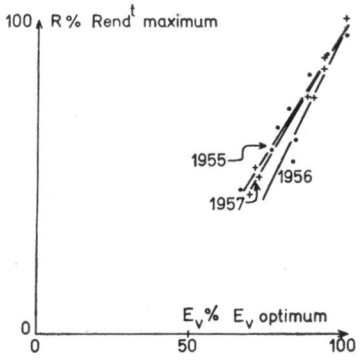
En réalité évapotranspiration et synthèse sont deux phénomènes non liés directement mais réagissant dans le même sens à une même cause.

STALFELT a mis en évidence (5) et de nombreux auteurs ont depuis confirmé l'existence d'un processus de fermeture des stomates sous la dépendance de l'état hydrique de la feuille. Cet état d'hydratation résulte lui-même de l'équilibre entre l'alimentation et l'évapotranspiration à chaque instant. Un déficit d'hydratation se traduit par la fermeture des stomates, freinant considérablement les échanges gazeux entre la feuille et l'atmosphère ambiante, en particulier le départ de vapeur d'eau (d'où

possibilité de réhydratation des tissus et de réouverture des stomates) et également la pénétration du CO_2 dont dépend l'activité photosynthétique. LEMÉE signale ainsi le remarquable parallélisme existant entre l'activité photosynthétique apparente et la transpiration dans les différentes conditions de sécheresse (6).

Lorsque l'approvisionnement en eau est par trop déficitaire, il y a flétrissement, arrêt de la photosynthèse par suite de la plasmolyse des cellules, et, de même, suspension de la transpiration. Les stomates sont fermés et seule peut susbister la transpiration cuticulaire.

Les différences d'évapotranspiration globales relevées chaque année dans les diverses conditions de profil réalisées reflètent ainsi normalement les écarts d'activité photosynthétiques qui se sont produits pendant toute la période végétative et que traduisent en définitive les différences de rendement.



GRAPHIQUE 5.

Un élément du rendement peut être particulièrement touché selon la phase végétative pendant laquelle se manifeste le déficit d'évaporation.

4° Sensibilité comparée des plantes étudiées, au déficit d'évapotranspiration.

Pour comparer d'une année à l'autre les corrélations entre rendements et évapotranspiration nous exprimerons dans chaque cas le rendement en pourcentage du rendement maximum (R p. 100) et l'évapotranspiration en pourcentage de l'évapotranspiration optimum (1) (E_vp. 100).

Nous obtenons les équations de régression suivantes :

en 1955

(betterave) (5) R p. 100 = 1,616 E_v p. 100 — 61,6 (graphique 5)

(1) L'évapotranspiration maximum ou potentielle obtenue sur les cases 12-24 entraîne des conditions anaérobies néfastes à la végétation. L'évapotranspiration optimum est celle des cases 11-23 (plan d'eau à 1 m 20) égale ou légèrement inférieure à la précédente.

en 1956

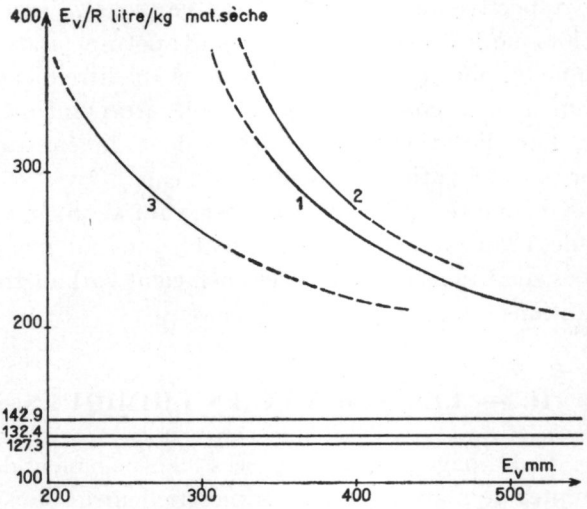
(orge) (6) R p. 100 = 2,172 E_v p. 100 — 117,2 (graphique 5)

en 1957

(maïs) (7) R p. 100 = 1,700 E_v p. 100 — 70,0 (graphique 5)

Il n'y a aucune différence significative entre les coefficients de régression pris deux à deux si l'on fixe 0,05 comme seuil de probabilité. L'écart entre les deux coefficients extrêmes ne devient significatif que si l'on prend 0,35 comme seuil de probabilité ($t = 1,06$ pour $n = 9$).

Compte tenu de la précision de nos mesures, la betterave, l'orge et le maïs réagissent donc de la même façon au déficit d'évapotranspiration ;



GRAPHIQUE 6. — Variation du coefficient d'évapotranspiration en fonction de l'évapotranspiration pendant la végétation.
Corrélation entre M. S. totale produite et Évapotranspiration pendant la période de végétation.

un déficit de 10 p. 100 sur l'évapotranspiration correspond en moyenne à une chute de 18 p. 100 des rendements, ceci dans l'intervalle 0-30 p. 100 de déficit d'évapotranspiration. On peut cependant noter une tendance de l'orge à se montrer plus sensible à la sécheresse dans sa production globale de matière sèche.

D. — ÉVAPOTRANSPIRATION PAR UNITÉ DE POIDS DE MATIÈRE SÉCHE

Des équations (2), (3), (4) nous tirons :

$$(8) \qquad \frac{E_v}{R} = 1\,324 + \frac{198,0}{R} \text{ ou encore } = 1\,324 + \frac{262,3}{E_v - 198,0}$$

$$(9) \qquad \frac{E_v}{R} = 1273 + \frac{218,2}{R} \text{ ou encore } = 1273 + \frac{278,2}{E_v - 218,2}$$

$$(10) \qquad \frac{E_v}{R} = 1492 + \frac{129,8}{R} \text{ ou encore } = 1492 + \frac{193,6}{E_v - 129,8}$$

$\frac{E_v}{R}$ est obtenu ici en mm par quintal à l'ha ; 1 mm sur un ha représentant un volume d'eau de 10 000 litres, les résultats sont à multiplier par 100 si l'on veut exprimer $\frac{E_v}{R}$ en litres par kg de matière sèche.

$\frac{E_v}{R}$ diminue et tend asymptotiquement vers 132,4, 127,3 et 149,2 litres par kg respectivement pour la betterave (1955), l'orge (1956) et le maïs (1957) lorsque les rendements ou les évapotranspirations augmentent (graphique 6). Son inverse ou « efficacité du litre d'eau évaporée » augmente donc avec la consommation globale. Au point de vue production agricole, l'amélioration des conditions de l'alimentation hydrique, en particulier par l'irrigation, économise de l'eau.

On se rend compte également qu'il est vain de fixer un coefficient d'utilisation de l'eau pour une même plante, sous un même climat et dans les mêmes conditions chimiques, ce coefficient variant très largement avec les conditions pédologiques.

II. — LES SUBSTANCES CHIMIQUES

Les eaux de drainage ont été analysées mensuellement dans les cases 19 et 7 à compter de mars 1954, puis trimestriellement dans les six cases lysimétriques dès mars 1955, à l'exception des nitrates dont l'analyse s'est poursuivie mensuellement.

A. — MÉTHODES ANALYTIQUES

L'échantillon d'eau de drainage est filtré dès le recueil.

Les nitrates sont immédiatement dosés sur 1 ou 2 cm³ par la méthode colorimétrique à l'acide phénoldisulfonique.

Après repos d'un mois à l'obscurité l'eau est à nouveau décantée et filtrée.

On dose le chlore sur 100 cc. par la méthode volumétrique au nitrate d'argent en présence de chromate.

L'extrait sec est obtenu par évaporation d'un litre d'eau par fractions dans une capsule de porcelaine tarée, la dessiccation est terminée à l'étuve à 125°.

L'extrait est calciné à 520°, puis repris par l'acide chlorhydrique

pour les dosages de SiO_2, $Al_2O_3 + Fe_2O_3$, CaO, MgO, K_2O et Na_2O par une technique analogue à celle décrite naguère par l'un de nous (7). Les analyses de P_2O_5 et SO_3 sont effectuées sur une partie aliquote du filtrat de la silice traité par l'ammoniaque et le carbonate d'ammonium, P_2O_5 est dosé par la méthode Lorenz sur la reprise nitrique du précipité d'hydrates et de carbonates et SO_3 par le chlorure de baryum sur le filtrat.

A partir du 4e trimestre 1955-56 des modifications ont été introduites pour gagner du temps ; elles portent sur les points suivants :

CaO et MgO sont directement dosés sur 25 cm³ d'eau par la méthode des complexons.

Les analyses de K_2O et Na_2O sont effectuées directement sur une partie aliquote de la reprise nitrique de l'extrait, P_2O_5 et SO_3 étant dosés sur le reste par la même technique, dans laquelle cependant la méthode Lorenz a été remplacée par la méthode colorimétrique au vanadate pour P_2O_5 (8).

Comme les taux de SiO_2, $Al_2O_3 + Fe_2O_3$ et P_2O_5 sont relativement faibles et peu variables, leur dosage n'a pas été effectué systématiquement sur tous les échantillons, et on a adopté respectivement les moyennes suivantes 11; 3 et 0,3 en mg/l.

Les indosés ont été évalués par différence entre l'extrait sec et la somme de tous les éléments dosés compris l'eau du SO_4Ca, 0,5 H_2O restant à 125°. Quelques analyses d'azote et de carbone organiques de l'extrait sec et les indices équivalentaires (tableau V et V*bis*) montrent que ces indosés correspondent surtout au CO_2 et à une petite quantité de matières organiques.

B. — COMPOSITION ET EXPORTATIONS DES EAUX DE DRAINAGE (Case 19).

L'extrait des eaux de drainage de la case nue, témoin est constitué pour 1/3 à 1/2 de N_2O_5, pour 1/4 de CaO, et le reste est partagé entre les autres éléments dans l'ordre décroissant d'importance suivant : SO_3, Indosés, Na_2O, MgO, K_2O, SiO_2, Cl, $Al_2O_3 + Fe_2O_3$ et P_2O_5.

De prime abord on observe une baisse générale de la concentration avec le temps par suite de l'épuisement ; de 1954 à 1957, elle est de l'ordre de la moitié pour tous les éléments à l'exception des indosés. Cette baisse n'est pas régulière ; on constate deux chutes importantes consécutives aux pluies abondantes de fin de printemps et d'été des années 1954 et 1956 (graphique 7).

Ces chutes correspondent surtout aux nitrates dont la teneur remonte ensuite à une valeur moins élevée que la précédente. On a ainsi des maxima de concentration en nitrates en juin-juillet 1954 et en mars-juin 1956. A ces maxima correspondent ceux de chaux et parfois de magnésie, l'ensemble entraînant les maxima principaux de l'extrait sec. Les sulfates présen-

TABLEAU V.

Composition et exportations annuelles des eaux de drainage.

	Cases nues										
	Drainage en mm	Extrait sec	N_2O_5	SO_3	Cl	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Indosés	Indices équivalentaires des indosés
Case témoin (19)											
*1932-33 mg/l	—	1 135	306	80,5	—	267	21,0	10,0	0,4	429,5	—
1954-55 mg/l	—	1 185	510	140	8,5	286	66,0	36,8	56,7	47,9	—
1954-55 méq	—	—	9,45	3,50	0,24	10,20	3,30	0,78	1,83	—	16,4
1932-33 kg/ha ...	200,2	2 271,8	612,3	161,1	—	534,5	42,1	20,0	0,8	859,5	—
1954-55 kg/ha ...	263,8	3 120,5	1 345,7	369,3	22,4	754,0	174,1	97,2	149,3	126,2	—
*1933-34 mg/l		1 220	477	114,5	—	316	22,3	7,4	0,4	257,6	—
1955-56 mg/l	—	943	390	85,0	6,6	225	47,6	33,7	53,5	77,0	—
1955-56 méq. ...	—	—	7,22	2,13	0,19	8,04	2,38	0,72	1,73	—	23,2
*1933-34 kg/ha ...	108,9	1 328,2	519,5	124,7	—	343,7	24,3	8,1	0,4	280,6	—
1955-56 kg/ha ...	147,4	1 389,5	574,6	125,5	9,70	331,6	70,3	49,6	78,8	113,6	—
*1934-35 mg/l	—	1 033	391	154,0	—	301	24,6	6,5	0,4	126,4	—
1956-57 mg/l	—	860	354	82,5	7,2	212	38,4	26,2	40,6	74,4	—
1956-57 méq.	—	—	6,56	2,06	0,20	7,58	1,92	0,56	1,31	—	29,2
*1934-35 kg/ha ...	261,2	2 698,2	1 021,6	402,2	—	786,2	64,3	17,0	1,0	330,1	—
1956-57 kg/ha ...	302,6	2 600,0	1 070,1	249,9	21,84	641,0	116,2	79,2	122,9	225,2	—
*1935-36 mg/l		475	137	69,0	—	144	13,3	2,5	0,4	89,3	—
1957-58 mg/l	—	673	260	59,2	4,8	161	30,6	24,8	38,3	74,0	—
1957-58 méq.	—	—	4,81	1,48	0,14	5,75	1,53	0,53	1,24	—	28,2
*1935-36 kg/ha...	303,4	1 439,7	414,2	209,5	—	436,9	40,4	7,6	1,2	270,9	—
1957-58 kg/ha ...	173,7	1 168,4	451,3	102,8	8,25	279,4	53,2	43,0	66,5	128,2	—
*1932-36 kg/ha ...	873,7	7 737,9	2 567,6	897,5	—	2101,3	171,1	52,7	3,4	1 741,1	—
1954-58 kg/ha ...	887,5	8 278,4	3 441,7	847,5	62,19	2006,0	413,8	269,0	417,5	593,2	—
1955-58 kg/ha ...	623,7	5 157,9	2 096,0	478,2	39,79	1252,0	239,7	171,8	268,2	467,0	—
Case à résidus de récolte (6)											
1955-56 mg/l	—	866	325	77,2	36,4	210	45,7	31,5	52,5	66,4	—
kg/ha ...	157,7	1 368,0	512,0	121,8	57,42	330,7	72,0	49,7	82,9	104,5	—
1956-57 mg/l	—	888	338	86,9	35,0	223	38,8	27,1	36,0	77,4	—
kg/ha ...	312,4	2 776,0	1 056,7	271,5	109,4c	697,4	121,1	84,9	112,5	241,9	—
1957-58 mg/l	—	610	200	57,0	19,6	148	29,6	22,2	36,2	77,5	—
kg/ha ...	201,1	1 228,3	408,5	114,5	39,45	298,4	59,5	44,7	72,9	155,9	—
1955-58 kg/ha ...	671,2	5 372,3	1 977,2	507,8	206,27	1326,5	252,6	179,3	268,3	502,3	—
Case à fumier (17)											
1955-56 mg/l		1 150	351	70,2	155,1	308	63,0	30,6	62,5	91,8	—
kg/ha ...	154,4	1 783,0	541,7	108,3	239,30	477,0	97,3	47,3	96,5	141,7	—
1956-57 mg/l		1 082	394	96,0	57,9	271	48,7	28,2	47,5	114,5	—
kg/ha ...	310,0	3 358,5	1 223,2	297,6	179,42	840,2	151,1	87,3	147,1	354,4	—
1957-58 mg/l	—	666	230	60,0	4,9	171	30,8	24,8	38,1	94,5	—
kg/ha ...	185,1	1 232,4	425,7	111,0	9,0	316,6	56,9	46,0	70,6	174,9	—
1955-58 kg/ha ...	649,5	6 373,9	2 190,6	516,9	427,72	1633,8	305,3	180,6	314,2	671,0	—

Les lignes marquées d'un * concernent les résultats obtenus dans les cases lysimétriques de Versailles.

TABLEAU V *bis*.

Composition et exportations annuelles des eaux de drainage.

		Cases cultivées										
		Drainage en mm	Extrait sec	N_2O_5	SO_3	Cl	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Indosés	Indices équivalentaires des indosés
Case témoin (7)												
*1932-33	mg/l ..	—	1 060	254,9	146	—	259	18,2	7,8	0,4	345,6	—
1954-55	mg/l ..	—	1 100	148	324	17,8	222	64,4	58,3	67,5	134,0	—
	méq. ..	—	—	2,74	8,10	0,5	7,9	3,22	1,24	2,18	—	41,3
*1932-33	kg/ha .	116,2	1 232,2	296,2	169,7	—	301,1	21,2	9,1	0,5	401,8	—
1954-55	kg/ha .	98,5	1 083,8	145,3	318,3	17,5	218,7	63,5	57,5	66,4	132,1	—
*1933-34	mg/l ..	—	1 087	370	167	—	325	21,9	6,5	0,4	165,1	—
1955-56	mg/l ..	—	1 013	172	235	14,4	211	59,8	53,5	68,5	157,5	—
	méq. ..	—	—	3,19	5,87	0,41	7,54	2,99	1,14	2,22	—	35,3
*1933-34	kg/ha .	60,2	654,2	222,9	100,7	—	195,7	13,2	3,9	0,2	99,2	—
1955-56	kg/ha .	12,7	128,8	21,9	29,9	1,83	26,8	7,6	6,8	8,7	20,0	—
*1934-35	mg/l ..	—	855	261	120	—	270	18,4	5,0	0,4	155,4	—
1956-57	mg/l ..	—	892	94	272	7,1	206	47,8	46,5	57,0	114,9	—
	méq. ..	—	—	1,74	6,80	0,20	7,35	2,4	0,99	1,84	—	29,9
*1934-35	kg/ha .	234,2	2 002,2	611,7	279,7	—	631,9	43,2	11,8	0,9	364,1	—
1957-58	kg/ha .	89,5	798,0	86,1	244,0	6,36	184,0	42,8	41,7	51,1	102,7	—
*1935-36	mg/l...	—	486	122	58	—	143	20,6	2,3	0,4	121,0	—
1957-58	mg/l ..	—	740	198	122	5,1	183	41,8	29,1	43,5	89,8	—
	méq. ..	—	—	3,68	3,05	0,14	6,53	2,09	0,62	1,40	—	23,8
*1935-36	kg/ha .	259,7	1 262,5	317,8	151,0	—	371,5	53,4	6,0	1,0	314,3	—
1957-58	kg/ha .	117,7	871,0	233,2	143,8	5,99	215,6	49,2	34,2	51,2	105,6	—
*1932-36	kg/ha .	670,3	5 151,1	1 448,6	701,1	—	1500,2	131,0	30,8	2,6	1 179,4	—
1954-58	kg/ha .	318,4	2 881,6	486,5	736,0	31,68	645,1	163,1	140,2	177,4	360,4	—
1955-58	kg/ha .	219,9	1 797,8	341,2	417,7	14,18	426,4	99,6	82,7	111,0	228,3	—
Case à résidus de récolte (18)												
1955-56	mg/l ..	—	1 123	172	230	41,7	220	63,4	75,5	88,5	192,6	—
	kg/ha .	14,8	166,2	25,5	34,1	6,17	32,6	9,4	11,2	13,1	28,5	—
1956-57	mg/l ..	—	1 062	115	304	58,8	257	55,8	64,0	72,0	88,0	—
	kg/ha .	102,1	1 085,0	117,4	310,0	60,02	262,5	57,0	65,3	73,5	89,8	—
1957-58	mg/l ..	—	905	204	142	44,5	228	51,8	34,7	51,8	111,0	—
	kg/ha .	121,0	1 092,4	247,3	172,0	53,70	276,1	62,7	42,0	62,6	134,2	—
1955-58	kg/ha .	237,9	2 343,6	390,2	516,1	119,89	571,2	129,1	118,5	149,2	252,5	—
Case à fumier (5)												
1955-56	mg/l ..	—	1 047	184	234	21,8	235	60,3	47,5	67,5	155,0	—
	kg/ha .	18,1	189,5	33,3	42,3	3,94	42,6	10,9	8,6	12,2	28,1	—
1956-57	mg/l ..	—	1 045	94	246	126,6	255	54,0	52,3	73,3	103,2	—
	kg/ha .	95,0	992,5	88,9	233,3	120,10	242,0	51,4	49,7	69,6	98,1	—
1957-58	mg/l ..	—	858	224	140	37,3	206	50,5	35,9	53,8	81,5	—
	kg/ha .	119,6	1 027,0	267,5	167,3	44,60	246,8	60,4	42,9	64,3	97,4	—
1955-58	kg/ha .	232,7	2 209,0	389,7	442,9	168,64	531,4	122,7	101,2	146,1	223,6	—

Les lignes marquées d'un * concernent les résultats obtenus dans les cases lysimétriques de Versailles.

tent aussi des maxima plus ou moins retardés sur ceux des nitrates, tandis que les indosés montrent leurs plus fortes valeurs en été et surtout en automne. Enfin des maxima secondaires de l'extrait sec correspondant à ceux des alcalins se situent à la suite des périodes sèches à faible drainage : juillet et décembre 1954, printemps et automne 1955 et automne 1957.

***

On peut présenter comme suit le processus général de lessivage dans les cases nues. Sauf pour la couche superficielle, l'humidité du sol de ces cases ne s'abaisse pas au-dessous du taux correspondant à sa capacité de rétention. Lorsque la hauteur de pluie dépasse la quantité nécessaire à l'imbibition de la couche superficielle compte, tenu de l'évaporation, l'excès s'infiltre dans le sol et au bout de quelques jours il draine une égale quantité d'eau. Si cet excès est faible, il y a percolation comme dans les expériences de Schloesing et les eaux de drainage ont une composition voisine des solutions du sol, en équilibre avec le complexe absorbant. Si au contraire cet excès est fort, les solutions du sol sont plus ou moins mélangées aux eaux superficielles plus riches en éléments résultant de l'activité biologique.

Par ailleurs il convient de distinguer deux groupes parmi les ions étudiés, du point de vue de leur comportement vis-à-vis de l'eau dans ce sol argilo-calcaire. D'une part les ions dont le passage en solution n'est pratiquement limité dans les conditions de l'expérience que par les quantités libérées des matières organiques : NO_3, Cl et SO_4. D'autre part ceux dont la concentration dans la solution du sol est fixée par des facteurs divers : pour CO_3 la tension de CO_2 dans l'atmosphère du sol; pour Ca en présence de calcaire, cette même tension de CO_2 et la quantité des autres anions solubilisants ci-dessus cités ; enfin pour Na, Mg, K et PO_4, le complexe absorbant du sol.

Des dosages mensuels de nitrates à la surface du sol ont montré (9) que l'activité microbienne n'est jamais nulle, augmente avec la température au printemps et en été, que ces sels ont tendance à s'accumuler après les périodes de sécheresse puis s'éliminent après des pluies importantes. Si ces pluies sont peu abondantes les eaux d'infiltration enrichissent en nitrates de proche en proche des couches de plus en plus profondes, et leur concentration croît de mois en mois dans l'eau de drainage. Surviennent des pluies abondantes, elles entraînent les nitrates accumulés tant en surface qu'en profondeur et les premières eaux sont riches. Mais le sol s'épuise de haut en bas et la concentration des eaux décroît dans les mois qui suivent. On constate donc un retard des effets sur les causes plus ou moins important suivant les cas.

En Limagne, les grandes pluies ont lieu à la fin du printemps ou en

été, après un hiver et un début de printemps relativement sec; c'est pourquoi les maxima ont lieu à cette époque. Les années à été humide comme 1954 et 1956, les nitrates formés pendant la saison chaude sont constamment drainés, il s'ensuit une diminution de la concentration des eaux de drainage jusqu'au printemps suivant. Au contraire, quand les étés sont moins humides, comme 1955 et 1957, les pluies de fin de printemps sont insuffisantes pour diluer longtemps les eaux de drainage et les nitrates formés en été contribueront à enrichir les eaux d'automne ou d'hiver. Les variations de la chaux et parfois de la magnésie suivent celles de l'azote nitrique, qui les a solubilisées.

Les maxima des indosés en été et automne de chaque année semblent corrélatifs de l'accroissement de l'activité biologique du sol pendant la saison chaude. Le décalage des maxima de sulfates par rapport à ceux des nitrates pourrait s'expliquer par la plus grande énergie de fixation des ions SO_4 sur le complexe calcique.

L'élévation du taux des alcalins dans les eaux de fin de drainage tend à montrer qu'il s'agit de solutions du sol peu diluées par les eaux superficielles. Par contre, on constate la faible variation de P_2O_5, conformément aux expériences de Schloesing.

***

Les quantités d'eau de drainage jouant beaucoup plus que les concentrations, il s'ensuit que l'évolution des exportations suit exactement celle du drainage. L'abaissement des concentrations en eléments minéraux dans le temps ne se manifeste que par le décalage vers le bas de la courbe des exportations par rapport à la courbe de drainage.

C. — INFLUENCE DES FUMURES ORGANIQUES
(Cases 19 — 6 et 17).

L'évolution de la composition des eaux de drainage des cases fumées présente la même allure générale.

L'influence des résidus de récolte ne se manifeste que par une diminution des nitrates plus ou moins compensée par une augmentation du chlore plus marquée en été ou en automne.

L'action du fumier est plus importante. Épandu en décembre 1954 à la dose de 50 t /ha, son effet apparaît dès l'été 1955 par un accroissement de l'extrait sec, qui se poursuit pour passer par un maximum au printemps 1956 et cesser à l'automne de cette même année. Cet accroissement résulte d'abord de l'augmentation considérable du chlore accompagné de chaux, de magnésie et d'un peu de soude, et de celle des indosés qui apparaît d'ailleurs dès le printemps. Les taux des nitrates d'abord plus bas par

rapport à ceux de la case témoin, ne deviennent plus élevés qu'à partir d'avril 1956.

Ces phénomènes semblent devoir s'expliquer assez aisément par la fermentation en deux temps du fumier. Dès le printemps 1955, celui-ci a subi une décomposition microbienne intense dégageant abondamment le gaz carbonique, consommant l'azote ammoniacal et nitrique, tandis que les chlorures alcalins sont libérés ; ceux-ci déplacent la chaux et la magnésie du complexe. La nitrification apparaît progressivement plus tard, elle a dû commencer dès l'été 1955, comme l'indiquent les analyses du sol superficiel, pour se poursuivre en automne et l'année suivante.

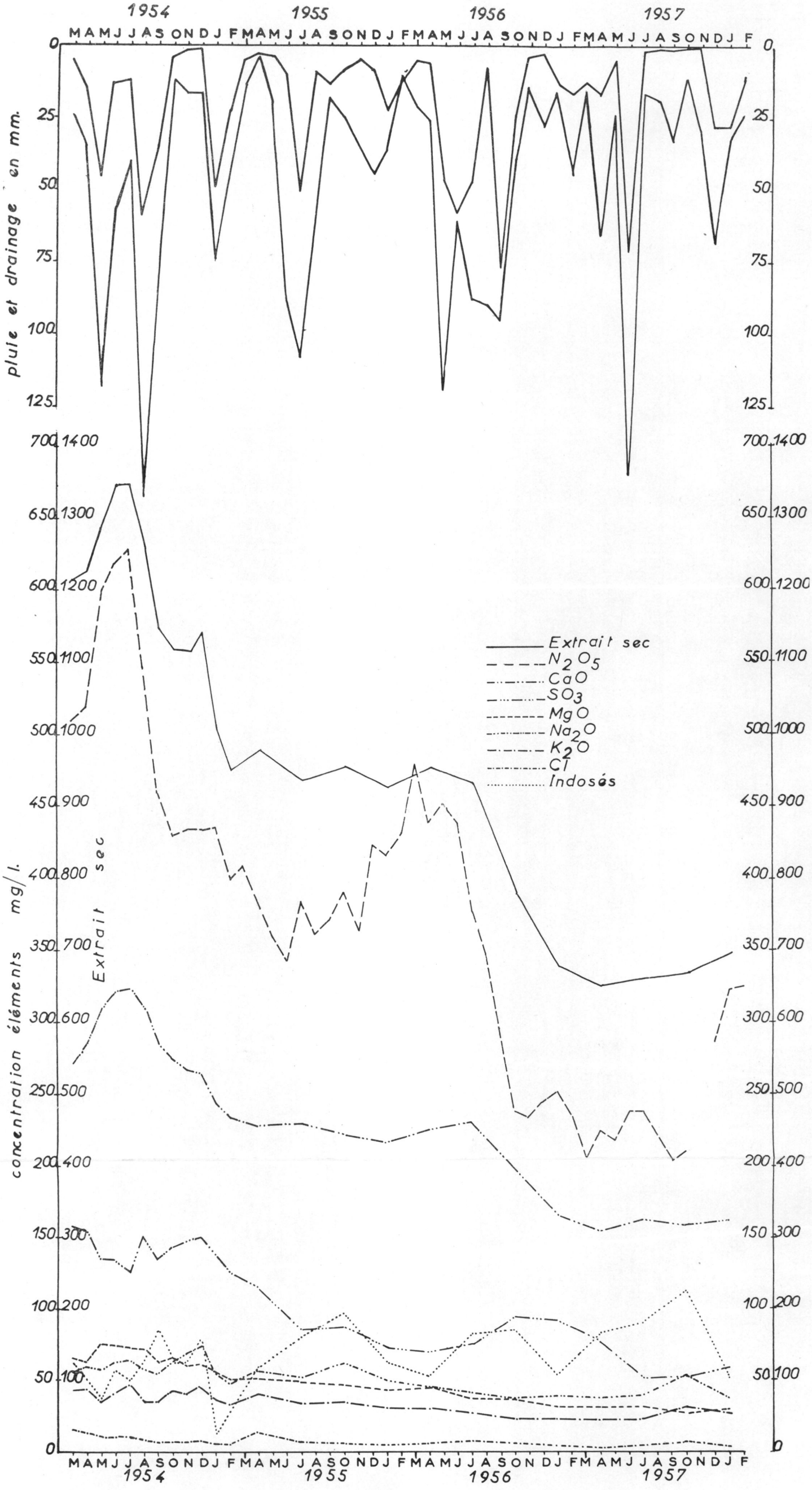
Pour les résidus de récoltes, l'activité biologique est moins intense ; on constate une consommation d'azote nitrique et une libération des chlorures qui présentent un caractère permanent, mais la formation supplémentaire de CO_2 n'est pas nettement mise en évidence, sans doute parce que les quantités de matières organiques appliquées sont plus faibles.

Comparons maintenant les apports minéraux des fumures avec les différences d'exportation par drainage des cases fumées et de la case témoin (tableau VI). Pour la case à résidus, on voit que la proportion des éléments drainés est faible sauf pour le chlore et la chaux, les alcalins sont fortement retenus ; elle est négative pour les nitrates. Pour la case à fumier cette proportion est encore moins élevée, à l'exception du chlore et secondairement de la soude et des nitrates. Il en résulte un enrichissement des cases fumées par rapport à la case témoin, mais il convient de remarquer qu'il reste très faible par rapport aux pertes générales par drainage.

On peut être surpris des quantités de chlore trouvées dans les eaux de drainage. Les augmentations considérables du taux de cet élément étant corrélatives de l'apport des fumures organiques, il faut penser qu'il s'agit du chlore qu'elles contiennent. Malheureusement les analyses de chlore n'ont pas été effectuées sur ce matériel. Mais des déterminations réalisées sur du matériel semblable provenant du même terroir, donnent des teneurs d'un ordre de grandeur suffisant pour justifier cette hypothèse. Quant aux petites quantités de chlore trouvées pour la case témoin, elles pourraient s'expliquer par les résidus organiques non encore décomposés ou des restes d'engrais chlorurés que contenait le sol initial ; ou encore par les seaux de pluie : J. GUÉRILLOT a trouvé à Grignon 17,2 kg par ha et par an (10).

D. — INFLUENCE DES CULTURES

L'influence des cultures sur la composition des eaux de drainage se manifeste par la diminution des nitrates, la faible variation de la chaux, et l'augmentation de tous les autres éléments, particulièrement les sulfates et les indosés.



Graphique 7.

Variations de composition de l'eau de drainage de la case témoin 19 de 1954 à 1958.

Tableau VI.

Comparaison entre les éléments minéraux importés par les fumures organiques et les différences de pertes par drainage des cases fumées et témoins.

Dates d'application	Nature	Qx/Ha		Kg/Ha								
		Matières fraîche	Matières sèche	Matières minérales	N_2O_5	SO_3	Cl	P_2O_5	CaO	MgO	K_2O	Na_2O
25/10/52	Feuilles et collets de carottes	118					Pas de détermination					
1/10/53	Paille de blé	100	92,2	812	156	(38,8)	(53)	10,8	36,0	21,2	167	(7,4)
19/8/54	Paille de blé	100	91,8	1 190	223	(38,5)	(52)	19,3	31,2	11,9	211	(7,3)
5/11/55	Feuilles et collets de betteraves	140	31,2	576	250	(37,4)	(35)	25,4	55,5	25,6	156	(73,0)
20/8/56	Paille d'orge	50	45,7	530	60	(16,0)	(26)	3,7	15,6	4,1	73	(3,7)
Sommes des importations 1954-56			168,7		533	(81,9)	(113)	48,4	72,3	41,6	440	(84,0)
Différences des pertes par drainage entre cases à résidus et témoins 1955-57 :												
Nues					— 119	29,5	167	0,14	74,5	12,9	7,4	0,0
Cultivées					49,0	98,4	106	0,05	14,5	29,5	35,8	38,2
2/12/54	Fumier	500	149	5 710	1 040		(396)	143	640	200	640	(116)
Différences des pertes par drainage entre cases à fumier et témoins 1955-57 :												
Nues					94,6	38,7	388	0,05	382	65,6	8,7	46,0
Cultivées					48,5	25,2	154	0,03	105	23,1	18,5	35,1

Les données entre parenthèses ne proviennent pas de l'analyse des fumures réellement enfouies ; elles ont été calculées sur la base de teneurs déterminées sur du matériel analogue.

On constate deux maxima de concentration en nitrates, l'un étalé de février à mai 1955, devant correspondre au maximum d'août 1954 de la case nue, retardé par la réduction du drainage ; l'autre en juillet 1957 comme pour la case nue, le drainage ayant été plus important. A la fin de la période de sécheresse de l'automne 1954, on observe pour les mois de novembre et décembre des maxima nets sur les alcalins comme en case nue, approximativement compensés par des minima non moins accusés sur les sulfates, la chaux et la magnésie non observables en case nue. Pour les années suivantes, les analyses trimestrielles ne permettent plus de déceler ces variations.

La baisse de l'extrait sec est plus faible ; en quatre ans elle n'est que d'un tiers ; les sulfates et la potasse sont particulièrement touchés, tandis que les nitrates et la chaux varient peu.

Ainsi que dans les cases nues, la fumure organique accroît la concentration de l'ensemble des éléments, comme l'indique l'extrait sec. Le taux de chlore augmente particulièrement ; dans la case à fumier le début de son drainage est retardé d'environ une année.

***

La réduction du drainage par les cultures entraîne une baisse importante des exportations, environ les deux tiers de l'extrait sec comptés sur quatre ans pour les cases témoins. Cette baisse est évidemment plus importante en périodes sèches qu'en périodes humides. Elle ne porte pas également sur tous les éléments ; elle est plus ou moins accentuée ou compensée suivant que la concentration décroît (nitrates) ou s'accroît (tous les autres éléments sauf la chaux) ; la compensation est presque totale dans le cas des sulfates.

***

Dans le tableau VII, ont été présentées pour les trois dernières années les exportations par drainage des cases nues et cultivées et les exportations par les récoltes pour les six principaux éléments de l'alimentation minérale.

S'il a été possible d'établir un bilan de l'eau pour une culture ou l'ensemble de deux cultures, ce calcul n'aurait aucune valeur pour les éléments minéraux, car les effets des cultures se superposent d'une année à l'autre. Tout au plus pourra-t-on présenter un bilan d'ensemble quand on disposera de données s'étendant sur un plus grand nombre d'années. On se bornera ici à indiquer le sens des mouvements observés.

Par rapport aux cases nues, les cases cultivées exportent beaucoup moins de chaux, moins de nitrates et de magnésie, à peu près autant de sulfates, plus de potasse, infiniment plus d'acide phosphorique.

D'autre part dans les cases cultivées, les récoltes ont exporté plus d'azote, d'acide phosphorique et de potasse qu'il en a drainé, tandis qu'il draine plus de sulfates, de chaux et de magnésie que les récoltes en ont exporté.

TABLEAU VII.

Comparaison des exportations totales des cases nues et cultivées pendant la période 1955-1957.

		En kg par ha						
		N_2O_5	SO_3	P_2O_5	CaO	MgO	K_2O	Totaux
		Cases témoins (19-7)						
Case nue (19) drainage.	1	2 096,0	478,2	1,8	1 252,0	239,7	171,8	4 239,5
Case cultivée (7) drainage	2	341,2	417,7	0,6	426,4	99,6	82,7	1 368,2
Exp. récolte G ou R.	3	683	35,4	70,7	23,0	33,9	102,9	949,2
Exp. récolte P ou F..	4	461	62,4	35,3	101,4	47,2	286,1	993,4
Total rec.	5	1 144	97,8	106,0	124,7	81,1	389,0	1 942,6
Total drain. + récolte .	6	1 485,2	515,5	106,6	551,1	180,7	471,7	3 310,8
Pourcentages 2 de 1		16,3	87,4	35,3	34,1	41,7	48,2	32,2
Pourcentages 6 de 1		70,1	108,1	6 247,0	44,1	72,5	274,5	78,0
Pourcentages 2 de 6		23,0	80,7	0,59	77,4	57,5	17,5	41,3
		Cases à résidus de récoltes (6-18)						
Case nue (6) drainage..	1	1 977,2	507,8	2,0	1 326,5	252,6	179,3	4 245,4
Case cultivée (18) drainage	2	390,2	516,1	0,7	571,2	129,1	118,5	1 725,8
Exp. récolte G ou R.	3	718	39,5	78,7	26,8	34,2	107,5	1 004,7
Exp. récolte P ou F..	4	445	64,6	36,6	101,7	42,5	341,9	1 032,3
Total rec.	5	1 163	104,1	115,3	128,5	76,7	449,4	2 037,0
Total drain. + récol. ..	6	1 553,2	620,2	116,0	699,7	205,8	567,9	3 762,8
Pourcentages 2 de 1		19,8	101,6	35,0	43,1	51,0	66,1	40,7
Pourcentages 6 de 1		78,7	122,2	5 800,0	52,7	81,5	316,7	88,5
Pourcentages 2 de 6		25,0	83,2	0,60	81,7	62,7	20,9	45,9
		Cases à fumier (17-5)						
Case nue (17) drainage.	1	2 190,6	516,9	1,9	1 633,8	305,3	180,5	4 829,0
Case cultivée (5) drainage	2	389,7	442,9	0,7	531,4	122,7	101,2	1 588,6
Exp. récolte G ou R.	3	689	37,8	80,3	22,3	33,6	112,1	975,1
Exp. récolte P ou F..	4	576	71,7	36,0	125,8	55,1	416,9	1 281,5
Total rec.	5	1 265	109,5	116,3	148,1	88,7	529,0	2 256,6
Total drain. et récol. ..	6	1 654,7	552,4	117,0	679,5	211,4	630,2	3 845,2
(2 + 3)..	7	1 078,7	480,7	81,0	553,7	156,3	213,3	2 563,7
Pourcentages 2 de 1		17,8	85,7	36,8	32,5	40,2	56,1	32,9
Pourcentages 6 de 1		75,5	107,1	6 157,8	35,2	69,2	349,1	79,7
Pourcentages 2 de 6		23,6	80,3	0,59	78,2	58,0	16,0	41,3
Pourcentages 2 de 7		36,1	92,5	0,86	96,3	78,4	47,4	62,0

*
* *

En présence de fumures organiques, le sens général de l'ensemble des observations décrites dans ce chapitre est peu modifié.

***

Des faits qui viennent d'être exposés, on peut proposer l'interprétation suivante :

Les cultures interviennent surtout par réduction du volume de l'eau de drainage par suite de la transpiration; par dégagement supplémentaire de gaz carbonique, soit directement par la respiration radiculaire, soit indirectement par la décomposition des résidus; enfin par absorption de certains éléments dont une partie est exportée par les récoltes, et le reste minéralisé à plus ou moins longue échéance.

La concentration des nitrates, sulfates et chlorures dans les eaux de drainage est donc fonction du volume d'eau et des quantités d'éléments en présence. Mis à part les apports par les eaux de pluie, celles-ci dépendent des quantités libérées des matières organiques sous l'action des micro-organismes et de celles consommées par les végétaux. On peut considérer que les premières sont représentées par l'exportation des cases nues, en négligeant l'influence des cultures sur l'activité microbienne, et les secondes par les exportations des récoltes auxquelles ont doit ajouter les retenues momentanées par les résidus.

Ainsi la diminution de la concentration en nitrates résulte de l'importance de la consommation des plantes en azote qui compense très au-delà l'augmentation due à la réduction du drainage. Pour les sulfates, au contraire, l'absorption végétale étant beaucoup plus faible pour une même quantité formée, la concentration s'accroît par réduction du drainage; l'augmentation des exportations totales des cases cultivées relativement aux cases nues (tableau VII) tendrait même à montrer l'existence d'une influence des cultures sur la libération de cet élément. On ignore les exportations des récoltes en chlore; mais l'importance relative des quantités drainées par les cases cultivées et nues, montre que cet élément se place dans une situation intermédiaire entre les deux précédents.

L'élévation du taux des indosés doit être en relation avec celle de la tension du gaz carbonique, mais elle peut aussi provenir de matières organiques comme l'indiquent les indices équivalentaires des indosés en 1954 et 1955.

Les faibles variations de la concentration en chaux résultent de la compensation entre l'abaissement des nitrates et l'accroissement des indosés et surtout des sulfates.

Enfin les teneurs en magnésie, potasse, soude et acide phosphorique en équilibre avec le complexe absorbant, ne peuvent pas être considérablement perturbées par les prélèvements végétaux. Les augmentations observées surtout pour les alcalins seront encore attribuées à la moindre dilution des solutions du sol.

E. — COMPARAISON AVEC LES RÉSULTATS LYSIMÉTRIQUES DE VERSAILLES (3).

Cette comparaison est valable pour les années similaires comptées à partir de l'année de mise en route, les différences observées résultant davantage de la nature des sols que des conditions météorologiques et les cultures dans les deux cas ne comportant pas de légumineuses. Pour les deux Stations les années de mise en place des sols sont respectivement 1930 et 1952 et les mesures n'ont commencé que deux ans plus tard. On comparera donc les deux périodes de quatre années 1954-57 pour Clermont et 1932-35 pour Versailles (tableau V et V bis).

Les extraits secs et les teneurs en nitrates, en sulfates et en chaux sont du même ordre. Les eaux de Versailles diffèrent par des concentrations plus faibles en magnésie, en potasse et surtout en soude, compensées par les taux nettement plus élevés des indosés.

En ce qui concerne les bases ces différences reflètent celles de la richesse chimique des sols. En effet, les teneurs en magnésie et potasse échangeable des trois horizons du sol initial de Versailles n'atteignent respectivement que 0,24 à 0,35 et 0,06 à 0,14 ; la soude n'a pas été déterminée.

Rappelons que la richesse chimique des terres noires est due à celle du matériel minéralogique initial dont les produits d'altération ont été conservés par suite de la faiblesse du drainage (11).

L'origine du sodium dont la teneur plus de 100 fois supérieure à celle trouvée à Versailles, est probablement en relation avec le caractère lagunaire d'un faciès du Stampien de Limagne, soit par la richesse en sodium de certaines de ses marnes (principales roches mères des terres noires), soit par les remontées d'eaux minérales sodiques existant en certains points de la région et susceptibles de se propager par les nappes phréatiques. Ces eaux minérales étant plus ou moins chlorurées, il ne paraît pas invraisemblable de considérer qu'elles ont pu aussi participer à l'enrichissement en chlore des terres, des cultures et du fumier des exploitations de cette partie de la Limagne.

L'importance des indosés à Versailles peut être attribuée à la plus grande activité biologique des sols de limon plus aérés que les terres noires, donnant naissance à une plus forte quantité de substances très dégradées et solubles, comme le montre la valeur plus élevée des indices équivalentaires. Mais elle peut avoir aussi partiellement comme origine le chlore apporté par le fumier que devait contenir la terre initiale, comme le montre la teneur élevée des indosés les deux premières années.

***

D'autre part, à Versailles, des variations mensuelles, trimestrielles et annuelles de l'extrait sec et des concentrations des éléments présentent plus d'amplitude ; les maxima sont donc beaucoup plus nets, les maxima principaux se situent généralement à l'automne à la reprise du drainage et sont décalés par rapport aux maxima d'exportation.

Il faut attribuer ces différences à la plus grande régularité de la pluviométrie sous le climat parisien. En particulier, les pluies de fin de printemps et d'été étant généralement moins importantes, les nitrates peuvent s'accumuler pendant cette période et apparaître avec les premières eaux de drainage à l'automne.

***

La paille, seule fumure organique expérimentée à Versailles [(12) p. 332, moyenne 1933-36, groupes 1 et 2], se manifeste contrairement à Clermont, par une élévation du taux de presque tous les éléments, particulièrement de SO_3, CaO et des indosés, témoignant encore de la plus grande intensité des fermentations aérobies dans les terres de limon.

***

Quant à l'influence des cultures, les différences entre Versailles et Clermont concernant la composition et les exportations des eaux de drainage relèvent entre autres de deux causes liées l'une et l'autre à la capacité globale de rétention en eau des sols : moindre exportation des récoltes et moindre réduction du drainage (1 /3 au lieu des 2 /3). Ainsi pour l'ensemble des quatre années comparées les pertes par drainage sont beaucoup plus élevées pour les cases cultivées de Versailles, tandis qu'elles sont du même ordre de grandeur pour les cases nues, tout au moins en ce qui concerne les principaux éléments : N_2 O_5, SO_3 et CaO.

F. — INFLUENCE DU PROFIL DE SOL

C'est la question la plus intéressante du point de vue pratique, la disposition de profil ayant indirectement une incidence importante sur les exportations des éléments fertilisants. L'installation actuelle des cases n'ayant pas été conçue pour l'étude détaillée de ces phénomènes, les données obtenues n'ont permis que d'entrevoir leur allure générale et de poser les problèmes. On se rappellera qu'il s'agit de terres noires riches en tous éléments fertilisants, seul l'azote pouvant être considéré comme facteur limitant. Avec des sols pauvres, le sens de certains phénomènes pourrait être différent.

1° Variation de la profondeur du sol sur substratum perméable à très faible capacité de rétention en eau.

En sol nu la profondeur n'ayant aucune influence sur le volume d'eau drainée, il y a élimination permanente des éléments minéraux.

En sol cultivé, les réserves d'eau s'accroissant avec la profondeur, les rendements en matières sèches augmentent, mais aussi la transpiration, d'où la diminution du drainage (tableau III). Ainsi l'accroissement de la profondeur du sol entraîne celui des exportations des récoltes et la réduction des pertes au drainage (Cases 5 et 8-20). La valeur d'autres facteurs favorables augmente aussi avec la profondeur ; tel est le cas en particulier de la quantité d'éléments fertilisants à la disposition des plantes. Celle-ci doit jouer un rôle d'autant plus important que le sol est plus pauvre. D'autre part, une analyse effectuée récemment sur l'eau de drainage des cases 8-20 tend à montrer qu'il y a augmentation des substances dissoutes avec cette profondeur.

Variations d'exportation en Hg/Ka.	N_2O_5	SO_3	P_2O_5	CaO	MgO	K_2O	Totaux
Pour un déficit d'eau drainée de 1mm	— 1,67	— 1,90	— 0,0003	— 2,28	— 0,53	— 0,43	— 6,81
Pour une augmentation de rendement correspondant de 73,7 kg	+ 3,54	+ 0,31	+ 0,32	+ 0,41	+ 0,24	+ 1,46	+ 6,28
Globales sans résidus	+ 1,87	— 1,59	+ 0,32	— 1,87	— 0,29	+ 1,03	— 0,53
Par augmentation des résidus des récoltes	— 1,61	— 0,20	— 0,10	— 0,35	— 0,15	— 1,17	— 3,58
Globales avec résidus	+ 0,26	— 1,79	+ 0,22	— 2,22	— 0,44	— 0,14	— 4,11

De plus la situation est différente pour chacun des éléments considérés séparément, selon l'importance relative de leur exportation, soit par les récoltes, soit par le drainage. Pour en donner une idée, on a calculé ci-dessous les variations d'exportation globale des principaux éléments fertilisants correspondant à une diminution de drainage de 1 mm, corrélative, comme on l'a vu précédemment, à une augmentation moyenne de 73,7 kg de matière sèche. Les variations possibles de la composition de l'eau de drainage ont été négligées. Enfin dans une dernière ligne, on a voulu montrer l'influence du retour des résidus de récolte. Ces calculs ont été effectués d'après les données de la case 5 (tableau VII).

Autrement dit, cela signifie que toute autre condition restant égale, l'exportation totale correspondant à l'unité de matière sèche récoltée, peut augmenter ou diminuer, selon l'élément considéré, avec l'accroissement de l'épaisseur du sol. Bien entendu il n'en reste pas moins que l'exportation par les récoltes augmente pour tous les éléments avec

la profondeur du sol; ce sont seulement les pertes par drainage qui diminuent. Si le calcul de la fumure s'effectuait suivant le seul principe de la restitution, cela voudrait dire que l'efficacité de l'unité d'élément fertilisant est variable avec la profondeur du sol dans un sens ou dans l'autre suivant la nature de l'élément, de la plante et du sol.

***

Dans les conditions naturelles lorsque le sol est mince, 40 à 50 cm, comme c'est le cas de certains sols perchés sur des terrasses alluviales, il y a élimination du calcaire venant s'accumuler en croute au niveau des galets.

Lorsque la profondeur du sol augmente, le drainage diminue et peut même s'annuler. On pourrait penser que le mouvement descendant de l'eau provoque encore un appauvrissement des couches supérieures au profit de couches inférieures. En fait les analyses verticales de tels profils ne révèlent rien de semblable. En effet les éléments subissent un mouvement contraire par diffusion de l'eau et par la végétation. On relève comme indice de mouvement de l'accumulation, quelques filaments pseudomycéliens de calcite dans la zone de départ de l'eau (40-60 cm) au niveau et en dessous de l'emplacement du système radiculaire.

2° Nature du substratum.

Quand le substratum présente une certaine capacité de rétention en eau comme le limon argilo-calcaire, suivant la valeur globale de cette capacité, il retient en partie ou en totalité l'eau de drainage et les substances minérales dissoutes qui peuvent être utilisées par les racines. Il en résulte une augmentation de la matière sèche, et aussi des exportations des récoltes. Celles-ci atteignent pour les cases 2-14 la valeur des cases 8-20, très supérieure à celle de la case 5.

Selon sa nature le substratum adsorbe certains éléments de l'eau qu'il retient et en cède d'autres. La remontée des substances minérales soit par l'eau de diffusion, soit par les plantes contribue à l'enrichissement du sol en certains éléments. Ce processus vient s'ajouter à la faiblesse du drainage pour expliquer le maintien de la saturation calcique du complexe de certaines terres noires complètement décalcarisées. Lorsque le substratum devient imperméable, si sa pente est faible il permet la formation d'une nappe aquifère superficielle, bénéfique ou nuisible pour les cultures selon son niveau.

3° Nappe aquifère et arrosages.

La présence d'une nappe a accru considérablement les exportations en augmentant les rendements (Case 5 et 11-23).

Plus le niveau moyen de l'eau est profond, moins le sol exporte par

drainage et moins il emprunte à l'eau de la nappe, mais plus il exporte par les récoltes, tout au moins jusqu'à une certaine limite variable avec la nature des espèces cultivées (Cases 12-24 → 11-23 → 1-13).

La nappe peut enrichir le sol en certains ions provenant du substratum ou de venues d'eaux minérales.

L'addition d'eau par arrosages a augmenté aussi les rendements et les exportations, qui se limitent à celles des récoltes si l'opération a été judicieusement conduite; sinon on peut accroître les pertes par drainage, d'autant plus facilement que le sol est mince.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

En sol nu l'évaporation et par conséquent le drainage dépendent seulement du climat et de la nature du sol et non de sa profondeur.

La culture augmente l'évapotranspiration; mais cette fois, ce phénomène dépend des conditions de profil: profondeur du sol et nature du substratum, car il est fonction des réserves d'eau utilisables. Ajoutons que la nature de l'espèce cultivée doit intervenir par ses aptitudes plus ou moins grandes à exploiter l'humidité profonde des sols.

L'irrigation souterraine ou superficielle accroît l'évapotranspiration totale pendant la période de végétation et la matière sèche produite jusqu'à une limite maximum appelée évapotranspiration potentielle, elle-même variable avec le couvert végétal et les conditions climatiques. On nommera « potentiel hydrique » d'un type de sol son aptitude à satisfaire cette évapotranspiration potentielle. Pour un profil donné, il est d'autant plus élevé que l'évapotranspiration potentielle est plus faible.

Pour une évapotranspiration potentielle déterminée, il y a proportionnalité entre l'évapotranspiration réelle et les rendements en matière sèche, quelles que soient les conditions d'alimentation en eau, sauf dans le cas d'excès créant des conditions anaérobies. On l'a interprété comme une covariation entre la transpiration stomatique et la photosynthèse.

Les rapports de proportionnalité varient très peu avec les espèces et les années. Si l'on prend comme termes les pourcentages des rendements maxima et des évapotranspirations optima, les coefficients de régression ne sont pas non plus significativement différents; les plantes étudiées présentent ainsi la même sensibilité au déficit relatif de l'évapotranspiration.

L'efficacité de l'eau évaporée croît avec la consommation globale.

Il faut bien préciser ici, pour éviter toute interprétation erronée, que les rendements sont en corrélation avec la quantité d'eau *évaporée*, et non pas avec la quantité d'eau disponible; on ne peut pas conclure à la

lecture de ces résultats, par exemple, que les rendements subiront un accroissement proportionnel au volume d'eau d'irrigation ; on a vu d'ailleurs que l'irrigation interférait sur l'utilisation des réserves.

***

Par comparaison avec Versailles, les eaux de drainage de Clermont se sont révélées riches en magnésie, potasse et soude et pauvres en indosés surtout en matières organiques, constatations qui s'expliquent par la constitution et la dynamique particulière des terres noires.

Dans les cases nues les maxima de concentration des éléments dont la libération est d'origine biologique correspondent aux grandes pluies de fin de printemps ou d'été survenant après des périodes relativement sèches. Au contraire, les maxima des alcalins s'observent dans les eaux de fin de drainage. Les variations des exportations suivent celles du drainage.

Les fumures organiques, surtout le fumier, augmentent la concentration de certains éléments minéraux des eaux de drainage, notamment les nitrates, le chlore et la chaux, les alcalins étant fortement retenus par le sol.

Les cultures agissent principalement par absorption de certains éléments et par réduction du volume d'eau de dissolution. Elles diminuent la concentration des nitrates parce que l'absorption est plus importante que la concentration ; elles augmentent celle des sulfates pour la raison contraire ; les faibles variations de chaux résultent d'une compensation des nitrates par les sulfates et bicarbonates. Les autres éléments varient peu grâce à leur équilibre avec le complexe adsorbant. La diminution des exportations par drainage est due beaucoup plus à la réduction du lysat qu'aux variations de concentration.

En cases nues la différence de répartition des maxima des nitrates entre Versailles et Clermont relève surtout des régimes des pluies. En cases cultivées les exportations plus grandes par drainage et plus petites par les récoltes à Versailles qu'à Clermont, sont dues davantage à la différence des capacités de rétention globale des deux sols qu'à celle des climats.

En effet on a montré que la production de matière sèche et l'importance du drainage dépendent finalement des conditions de profil, lesquelles participent donc pour une part importante au déterminisme des exportations.

***

Si la lysimétrie portant sur un même type de profil permet d'étudier les effets de différents traitements, les résultats obtenus ne peuvent être étendus à d'autres types, même si la nature physico-chimique du sol

reste la même. On a vu que tout change considérablement, tant dans la dynamique de l'eau que des substances chimiques, dès que le sol est plus profond, qu'il repose sur un substratum retenant plus ou moins l'eau, qu'il présente une nappe utilisable.

Dans les études lysimétriques classiques, il est nécessaire d'avoir un sol assez mince drainant beaucoup pour permettre l'établissement de bilans annuels. On se borne donc à étudier la dynamique d'un sol très particulier, à faible capacité de production et à assister à son épuisement rapide ; cas assez rare dans les conditions naturelles où le sous-sol participe à la production et freine l'épuisement en réduisant le drainage et en augmentant les remontées par les racines et la diffusion.

Par contre l'étude plus précise de l'influence des conditions de profils auxquelles il convient d'ajouter la situation topographique, sur le dynamisme hydrique et chimique permettra de connaître plus rationnellement les aptitudes culturales des sols : capacité de production pour les différentes espèces cultivées, donc le choix de ces espèces, les modalités d'application de certaines techniques culturales, densité d'ensemencement ou de plantation, amendements et fumures, la conduite des opérations de drainage et d'irrigation.

En particulier on se rend compte que les besoins en éléments fertilisants des sols sont largement fonction des conditions de profil, intervenant non seulement dans les exportations, mais aussi sur l'importance des sources qui croît avec la profondeur du sol et la participation du substratum ou de la nappe ; ils dépendent de plus des aptitudes propres aux différentes espèces cultivées à exploiter le milieu. Dans ces conditions on comprend que si l'on savait parfaitement déterminer les aptitudes d'une terre à céder ses éléments fertilisants, cette donnée reste insuffisante pour l'estimation des besoins des sols en place. La faible corrélation que l'on observe dans bien des régions entre les réactions aux engrais et les résultats d'analyses de sol ne relève donc pas seulement de l'insuffisance des doses expérimentées ou de l'imperfection des méthodes employées.

Enfin ces études pourront contribuer à la connaissance de l'évolution pédologique des sols cultivés.

On voit que l'intérêt de ce travail dépasse en bien des points, le cadre régional pour lequel il avait été primitivement conçu.

RÉSUMÉ

Les auteurs ont déterminé le drainage et les rendements obtenus dans des cases de végétation dont les sols présentent des différences soit par leur profondeur, soit par la nature de leur substratum, soit par le niveau d'une nappe aquifère ; enfin quelques cases ont été irriguées par aspersion. Les eaux

de drainage et les récoltes ont été analysées. Les résultats des quatre premières années d'expérience ont conduit aux conclusions suivantes :

En sol nu, dont la profondeur est supérieure à la couche superficielle subissant les alternatives de sécheresse et d'humidité, l'évaporation ne dépend pas des conditions de sous-sol. Au contraire, en sol cultivé, l'évapotranspiration est variable avec ces conditions, les végétaux utilisant les réserves d'eau situées au-delà de la couche superficielle.

Pour de mêmes conditions climatiques les rendements en matière sèche sont proportionnels aux évapotranspirations, jusqu'à une limite maximum appelée évapotranspiration potentielle, sauf en cas d'excès d'eau créant des conditions anaérobies.

D'autre part, en agissant sur le drainage et le rendement en matière sèche produite, les conditions de sous-sol règlent les exportations en éléments minéraux.

SUMMARY

Contribution to the study of the dynamics of water and of chemical substances in the calcareous clay soils of Limagne. Results of four-year lysimetric observations.

The drainage and crop yields were determined in cases filled with soils of different depth, nature and water-table, while some of the crops were given overhead irrigation. The first four years of experiments yielded the following results :

In bare soil possessing a greater depth than the surface layer which is subject to alternate drying and wetting, evaporation does not depend on subsoil conditions. On a cultivated soil, these conditions affect evapo-transpiration, since the crops utilize moisture reserves from below the surface layer.

Under similar climatic conditions, dry-matter yields are proportional to the evapo-transpiration up to the limit of potential evapo-transpiration, except where excess water creates anaerobic conditions.

Subsoil conditions, on the other hand, have a regulating effect on the outgo of mineral nutrients, by influencing the drainage and dry-matter yields.

ZUSAMMENFASSUNG

Beitrag zur Untersuchung der Dynamik des Wassers und der chemischen Substanzen in den Tonkalkböden der Limagne. Ergebnisse von vier lysimetrischen Untersuchungsjahren.

Die Autoren haben die Drainage und die Erträge bestimmt, die in Lysimetern erreicht wurden deren Böden sich entweder durch ihre Tiefgründigkeit oder durch die Eigenschaften des Substrats oder durch die Grundwasserhöhe unterschieden ; endlich wurden einige Lysimeter künstlich beregnet. Das Drainagewasser und die Ernten wurden analysiert. Die Ergebnisse der vier ersten Versuchjahre führen zu folgenden Schlussfolgerungen :

Bei unbedecktem Böden wo die Tiefgründigkeit grösser als die abwechselnd befeuchtete und austrocknete obere Schicht ist, hängt die Verdunstung nicht von den Untergrundverhältnissen ab. Dagegen bei bebauten Böden hängt die

Evapotranspiration von diesen Verhältnissen ab, da die Pflanzen die tieferliegenden Wasservorräte ausnützen.

Für gleiche klimatische Bedingungen sind die Trockenmasseerträge den Evapotranspirationen verhältnissmässig bis zu einem Maximum dass potentiale Evapotranspiration genannt wird, mit Ausnahme von Wasserüberschüssen die anaerobe Verhältnisse bilden.

Andererseits bestimmen die Untergrundverhältnisse die Ausfuhr an Mineral Nährstoffen durch ihre Auswirkung auf die Drainage und auf den Trockenmasseertrag.

К изучению динамики воды и химических веществ в глинисто-известковых почвах Лимани.
Результаты четырех лет лизиметрических наблюдений.

Д. КОЛЛЬЕ и М. РОБЛЭН. (Клермон-Ферран.)

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Авторы измерили дренаж и урожаи лизиметров, почвы которых отличаются по их глубине, или по природе их подпочвы, или по уровню их грунтовых вод; сверх того, несколько лизиметров были орошены обрызгиванием. Дренажные воды и урожаи были анализированы. Результаты опытов первых четырех лет привели к следующим выводам :

Если почва гола и если ее глубина превышает поверхностный слой подвергающийся сменам сухости и влажности, испарение не зависит от условий подпочвы. Наоборот, в почве покрытой растениями, общее испарение («évapotranspiration», то-есть сумма испарений с поверхности земли и листьями растений) изменяется в зависимости от подпочвы, так как растения пользуются водяными резервами, находящимися ниже поверхностного слоя.

В данных климатических условиях, производство сухого вещества пропорционально общему испарению (évapotranspiration), до некоторой максимальной границы, называемой «возможное испарение», за исключением случая избытка воды, создающего анаэробные условия.

Условия подпочвы, влияя на дренаж и на производство сухого вещества, управляют расходом минеральных элементов.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) Collier (D.), Gachon (L.) et Robelin (M.). — *C. R. Ac. Agr.*, 134, 1954 ; 263, 1955 ; 512, 1956 ; 864, 1957 · 610, 1958.
(2) Collier (D.) et Gachon (L.). — *Ann. Agr.*, 673, 1954.
(3) Bastisse (E. M.) et Henin (S.). — *Ann. Agr.* II, 203, 1954.
(4) Bastisse (E. M.). — *Ann. Agr.*, 727, 1951.
(5) Stalfelt (M. G.). — *Physiologia Plantarum*, **8**, 572, 1955.
(6) Leméé (G.). — *Rev. Gén. Bot.*, **63**, 41, 1956.
(7) Collier (D.). — *Ann. Agr.*, 329, 1947.
(8) Gachon (L.). — *Ann. Agr.*, 697, 1955.
(9) Collier (D.). — *Ann. Agr.*, 675, 1954 ; 722, 1955 ; 873, 1956.
(10) Guerillot (J.). — Thèse, Paris 1937.
(11) Collier (D.). — *Ann. Agr.*, 1, 1949.
(12) Bastisse (E. M.). — *Ann. Agr.*, 331, 519 et 717, 1953.

632. 121 : 546. 18 : 581. 175

CARENCE EN ACIDE PHOSPHORIQUE ET CONCENTRATION EN PIGMENTS SOLUBLES

PAR

A. HAMY

Station Agronomique, Châteauroux

PLAN DU MÉMOIRE

I. — Expériences en pots.

a) technique utilisée.
b) répartition de la matière colorante dans les plantes.
c) influence de l'humidité du sol.
d) influence de P_2O_5.

II. — Expériences au champ.

III. — Étude des pigments.

IV. — Considérations générales et conclusions.

INTRODUCTION

Dans un travail antérieur (1), nous avons indiqué qu'il existait une relation entre la concentration en pigments solubles des extraits trichloracétiques et la croissance de l'orge à l'époque du tallage.

C'est à cette période que se détermine le nombre d'épis et le nombre de grains par épi, deux des principaux facteurs du rendement. L'étude de cette période est donc importante et nous nous limiterons à ce stade pour approfondir les modifications subies par les substances, de nature flavoniques que l'on peut extraire de l'orge (var. Kénia).

Nous avions étudié leur concentration dans les extraits de la plante entière. Nous préciserons maintenant, celle de ses différentes parties et, la séparation des principaux colorants.

I. — EXPÉRIENCES EN POTS

a) Technique.

Dans des pots en grès, contenant 7 kg de terre, légèrement acide, on a ajouté une fumure de base (1,4 g nitrate de potasse, 6 g CO_3 Ca, 0,5 g sulfate de soude, phosphate bicalcique en quantité variable) et semé de l'orge à raison de 24 grains par pot. Cette densité n'est admissible que parce que les plantes étaient récoltées très jeunes. Dans des expériences ultérieures l'influence de la densité du semis sera examinée.

La terre est d'origine micashisteuse.

Sable gros.....	23,4	
Sable fin	18,3	
Sable très fin.....	16,4	pH final, après action du CO_3Ca : 7,6
Limon	22,2	
Argile.....	18,0	

Les plantes des divers lots ont été récoltées le même jour, et séparées en plusieurs parties, qui ont été analysées séparément.

Pour étudier les matières colorantes, on a broyé 20 g de ces différentes parties avec 30 cc d'acide trichloracétique à 14 p. 100. On passe sur Buchner en présence d'un peu de Clairsel pour faciliter la filtration. Le liquide qui s'écoule reste louche. Ce louche est dû à la présence d'une substance grasse (1). Pour éclaircir le liquide, on agite fortement avec du chloroforme (0,5 cc pour 10 cc de liquide) ; l'émulsion formée peut être séparée soit par une forte centrifugation, soit par une filtration sur une colonne de Clairsel tassé sur une hauteur de 2 à 3 cm, dans un tube de 1,5 cm de diamètre. La couche chloroformique retenue est colorée en vert, ce qui indique qu'il s'agit de corps chlorophylliens.

Les solutions que l'on obtient foncent avec le temps. Il y a donc lieu d'attendre 48 heures avant de faire la colorimétrie. Après ce temps, la couleur continue à foncer très lentement.

Il en résulte qu'il faut opérer au bout d'un temps et à une température donnés. Le mieux est de mettre la solution à l'obscurité dans une armoire frigorifique à 2°.

Les mesures ont été faites au photocolorimètre en utilisant l'écran bleu ou l'écran vert suivant les cas.

L'acide phosphorique a été précipité à l'état de phosphate ammoniaco-magnésien en milieu citro-ammoniacal ; le précipité a été redissous par l'acide sulfurique et le dosage effectué par colorimétrie. Il est exprimé en mg de P_2O_5 par litre d'eau contenue dans la plante. C'est sur le liquide filtré que sont mesurées les D. O. en milieu citro-ammoniacal.

Séparation des pigments solubles. Les extraits trichloracétiques (envrion N/2 d'acide trichloracétique) sont passés sur alumine. Celle-ci

(1) Après évaporation du chloroforme, il reste une substance, qui produit de irisations quand on ajoute un peu d'eau, et qui contient aussi des matières azotées.

retient en haut de la colonne des pigments jaune et brun, qu'on peut séparer par divers réactifs.

On utilise d'abord l'acide trichloracétique 2 N, qui élue un pigment jaune, mais la séparation n'est pas nette, une partie du pigment retenu passant en solution. En diluant l'éluat avec de l'eau de manière à le rendre N /2 et en le repassant sur une autre colonne, on retient le pigment et une nouvelle élution avec acide trichloracétique 2 N donne une séparation convenable.

On fait ensuite passe H Cl 2 N qui élue la substance fixée sur les colonnes.

Il existe un troisième colorant à peine jaune en milieu acide, qui n'est que partiellement retenu par l'alumine et qui se colore fortement en milieu ammoniacal. Lorsqu'on traite la colonne par un tampon acéto-acétique la colonne devient jaune; c'est donc surtout son existence que l'on peut caractériser.

b) **Répartition des pigments solubles dans la plante.**

La terre ayant été maintenue à 13 p. 100 d'eau, la composition de la plante a été étudiée à 3 stades de végétation : Pour le lot J : 4e feuille pointant — 4e feuille à moitié sortie — 5e feuille pointant. Nous avons mesuré la coloration des extraits trichloracétiques, en milieu acide, et après addition de citrate d'ammoniaque ammoniacal, c'est-à-dire en milieu ammoniacal.

Les quantités de phosphate bicalcique apportées aux deux lots comparés sont 0,25 g pour le lot J et 2,25 g pour le lot R, les indices 1,2 et 3 indiquant : feuille cotylédonaire, 2e et 3e feuille ; *b* représente la partie de la plante dépourvue du limbe des feuilles.

Cette étude a porté uniquement sur les pigments solubles.

Prélèvement du 21 juin.

Après avoir séparé les diverses parties de la plante, les poids étaient pour cent plantes :

	Poids vert	Eau	Matière sèche	Eau % de matière verte
J_1	9,19	8,2	1,08	88,8
J_2	7,32	6,29	1,02	86
J_3	8,43	7,42	1,09	87,7
J_b	8,58	7,80	0,81	91
R_1	9,89	8,81	1,12	88,7
R_2	8,57	7,37	1,18	86,2
R_3	10,5	9,18	1,31	87,5
R_b	11,1	10,1	0,96	91,3

Pour J_b et R_b, il s'agit de ce qui reste de la plante après avoir enlevé

les limbes des 1re, 2e, et 3e feuilles; l'eau et les mesures optiques ont été déterminées sur cette partie privée de la 4e feuille commençant à sortir.

Les solutions trichloracétiques ont été passées au photocolorimètre (écran bleu) et on a obtenu les résultats suivants :

	D. O.		D. O.
J_1	c,26	R_1	0,23
J_2	0,205	R_2	0,18
J_3	0,11	R_3	0,12
J_b	0,08	R_b	0,05

En diluant J_1 et R_1, on a pu tracer la ligne D. O. en fonction de la concentration, celle-ci étant égalée à l'unité pour la concentration la plus forte ; on aura les D. O. correspondant aux concentrations 1-0,5-0,33-0,25. A l'aide de cette courbe, on a calculé les concentrations relatives en pigments.

La mesure de la D. O. a également été faite en milieu citro-ammoniacal (écran bleu). Les extraits étaient colorés en brun ou jaune suivant la concentration.

	D. O.		D. O.
J_1	0,43	R_1	0,37
J_2	0,55	R_2	0,46
J_3	0,65	R_3	0,48
J_b	0,11	R_b	0,08

Dilution (4 cc de solution trichloracétique + 4 cc de citrate d'ammoniaque ammoniacal).

Prélèvement du 24 juin.

Stade de végétation : 4e feuille très petite pour J et un peu plus grande pour R (l'importance en est donnée ci-dessous par le poids vert de la 4e feuille).

Après avoir séparé les diverses parties de la plante, les poids de celles-ci pour cent plantes sont :

	Poids vert	Eau	Eau % de matière verte	Matière sèche
J_1	9,7	8,48	87,5	1,21
J_2	7,4	6,20	83,8	1,20
J_3	10	8,45	84,5	1,55
J_4	3,7			
J_b	10,4	9,18	88,3	1,21
R_1	9,8	8,53	81,1	1,28
R_2	8,4	7,16	84,1	1,33
R_3	11,7	9,87	84,4	1,82
R_4	6,3			
R_b	14,2	12,6	88,7	1,60

Pour J_b et R_b, il s'agit de ce qui reste de la plante après avoir enlevé les limbes des 1re, 2e, 3e et 4e feuilles.

Les solutions trichloracétiques ont été passées au photocolorimètre

(écran bleu pour J_1-J_2 et J_3 et écran vert pour J_b et R_b). Les résultats sont les suivants :

	D. O.		D. O.
J_1	0,43) brun	R_1	0,37) brun
J_2	0,32) ou	R_2	0,31) ou
J_3	0,17) jaune	R_3	0,17) jaune
J_b	0,17 color. rose	R_4	0,06 color. rose

La mesure de la D. O., faite en milieu citro-ammoniacal (écran bleu) a donné les résultats suivants (coloration brune ou jaune suivant la concentration) :

	D. O.		D. O.
J_1	0,48	R_1	0,45
J_2	0,62	R_2	0,55
J_3	0,68	R_3	0,60
J_b	0,14	R_b	0,10

On voit que la variation de la D. O., se fait en sens inverse, en milieu acide et en milieu alcalin, lorsqu'on passe de la 1re à la 3e feuille.

Prélèvement du 27 juin.

Le 3e prélèvement a eu lieu lorsque la 5e feuille pointait.

Les différentes parties de la plante présentaient les caractéristiques suivantes, pour cent plantes :

	Poids vert	Eau	Eau % de matière verte	Matière sèche
J_2	7,6	6,43	84,7	1,16
J_3	10,5	9,0	85,7	1,50
J_4	8,6	7,31	85,0	1,29
J_b	15,8	14,1	89,6	1,64
R_2	8,0	6,83	85,4	1,17
R_3	12,6	10,7	85,3	1,85
R_4	13,4	11,5	85,6	1,93
R_b	19,0	17,1	90,0	1,90

La D. O., des solutions trichloracétiques a donné les résultats suivants :

	D. O.		D. O.
J_2	0,43	R_2	0,37
J_3	0,21	R_3	0,23
J_4	0,14	R_4	0,14
J_b	0,22	R_b	0,10

En milieu ammoniacal, on obtient :

	D. O.		D. O.
J_2	0,69	R_2	0,62
J_3	0,60	R_3	0,58
J_4	0,70	R_4	0,47
J_b	0,14	R_b	0,09

On voit que le poids des 1re et 2e feuilles change peu par apport

d'engrais phosphaté ; par contre celui de la 3e feuille et celui de la base sont notablement augmentés. La coloration propre de ces deux parties de la plante intervient dans la coloration de l'extrait de la plante

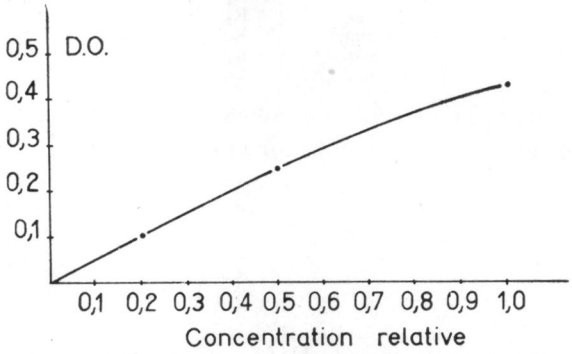


FIG. I. — Concentration relative et Densité Optique en milieu trichloracétique.

totale, en la diluant lorsque la plante est jeune (1er prélèvement).

Si l'on trace les graphiques des D. O. en fonction des dilutions successives faites avec le réactif d'extraction, on constate en milieu acide que

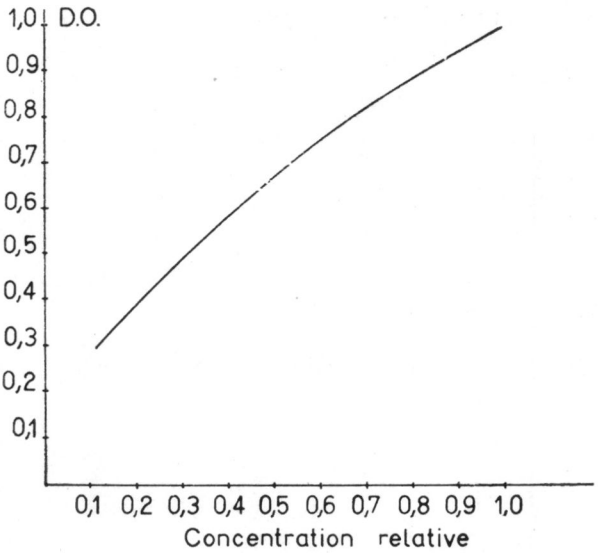


FIG. II. — Concentration relative et Densité Optique en milieu ammoniacal.

la loi de Beer n'est pas respectée. On trouve des courbes assez tendues comme le montre la figure 1. Ces différentes courbes sont superposables lorsqu'on multiplie les concentrations de chacune par un même nombre; ceci permet de comparer les résultats des divers prélèvements

en adoptant le graphique qui donne les valeurs des D. O. les plus élevées. La valeur la plus élevée de celui-ci est prise pour unité. Il s'agit donc d'intensité relative. La courbe de dilution des extraits de la base des plantes se superpose à la courbe prise pour reférence (J_2 3e prélèvement).

On obtient ainsi les concentrations suivantes, en prenant pour unité la D. O. = 0,43.

	1er prél.	2eme prél.	3eme prél.		1er prél.	2eme prél.	3eme prél.
J_1	0,51	1,0		R_1	0,45	0,83	
J_2	0,40	0,67	1,0	R_2	0,34	0,65	0,83
J_3	0,20	0,33	0,40	R_3	0,22	0,33	0,46
J_4			0,26	R_4			0,28
J_b	0,15	0,33	0,43	R_b	0,10	0,11	0,19

On constate qu'en milieu acide trichloracétique, les modifications provoquées par la carence quoique peu importantes pour le limbe des feuilles, s'élèvent au cours du temps. Par contre pour la base, les variations sont très importantes et ne sont pas dues exclusivement à la variation de poids entre plante carencée et non carencée, puisque les rapports des poids correspondants sont respectivement $\frac{129}{100}$ pour le 1er, $\frac{136}{100}$ pour le 2e et $\frac{121}{100}$ pour le 3e prélèvement.

Si on calcule la concentration totale, résultant du mélange des différentes parties de la plante, on constate une augmentation de la coloration avec l'âge. C'est ce que nous avons pu constater dans d'autres expériences. Les prélèvements ayant été faits le même jour, le développement des plantes carencées étaient un peu en retard sur les autres. Il en résulte que si on voulait comparer les plantes au même stade de végétation (dans des conditions extérieures constantes) les écarts seraient encore plus accentués.

En milieu citro-ammoniacal, en opérant de façon analogue, on obtient les concentrations suivantes :

	1er prél.	2e prél.	3e prél.		1er prél.	2e prél.	3e prél.
J_1	0,48	0,6		R_1	0,37	0,52	
J_2	0,73	0,85	1,0	R_2	0,55	0,73	0,85
J_3	0,92	0,98	0,81	R_3	0,58	0,81	0,78
J_4			1,0	R_4			0,57
J_b	0,08	0,1	0,06	R_b	0,06	0,07	0,06

On constate ici aussi que la concentration croît avec l'âge pour la 1re et la 2e feuille et pour la 3e entre le 1er et le 2e prélèvement.

Les extraits de feuille des plantes carencées sont toujours plus colorées que ceux des feuilles non carencées; la différence est la plus grande pour la 3e feuille surtout lors du 1er prélèvement, et pour la 4e lors du 3e prélèvement.

La quantité totale de pigments solubles contenue dans une feuille,

sera égale au volume d'eau contenue dans le poids vert pour cent plantes multiplié par la concentration relative.

	Solution trichloracétique	Solution citro-ammoniacale	Poids sec.
1er Prél. :	J_3 7,42 × 0,20 = 1,48	7,42 × 0,92 = 6,82 Diff. = 1,50	Diff. = 0,22
	R_3 9,18 × 0,22 = 2,02	9,18 × 0,58 = 5,32 Rapp. = 1,28	Rapp. = 1,20
2e Prél. :	J_3 8,45 × 0,33 = 2,79	8,45 × 0,98 = 8,28 Diff. = 0,29	Diff. = 0,27
	R_3 9,87 × 0,33 = 3,26	9,87 × 0,81 = 7,99 Rapp. = 1,03	Rapp. = 1,17
3e Prél. :	J_3 9,00 × 0,40 = 3,60	9,00 × 0,81 = 7,29 Diff. = 1,05	Diff. = 0,35
	R_3 10,70 × 0,46 = 4,92	10,70 × 0,78 = 8,34 Rapp. = 1	Rapp. = 1,23
		1,14	
	J_4	7,31 × 1,00 = 7,31	
	R_4	11,50 × 0,57 = 6,55	

Lors des deux premiers prélèvements, la concentration en milieu acide est plus forte en R qu'en J ; elle est plus petite en milieu ammoniacal.

Elle croît avec l'âge, pour les trois prélèvements en milieu acide et pour les deux premiers en milieu ammoniacal. La différence des colorations totales J-R est plus grande pour le 1er prélèvement que pour le second et est inversée pour le 3e en milieu ammoniacal, alors que la différence des quantités de matières sèches formées varie en sens inverse.

Ceci montre qu'il n'y a pas simple dilution par suite du développement provoqué par l'engrais phosphaté.

Dans une expérience, faite en avril-mai, la terre a été maintenue à 17 p. 100 d'humidité. Les quantités de phosphate bicalcique apportées ont été : 0 pour le lot J, 0,4 g pour le lot N et 2,0 g pour le lot R. Les plantes ont été coupées le 12 mai.

Le tableau ci-dessous indique les résultats pour cent plantes ; les D. O. ont été mesurées à l'écran bleu.

	P sec	P vert	Eau %		P sec	P vert	Eau %		P sec	P vert	Eau %
J_1	0,90	8,6	89,6	N_1	1,08	10,3	89,5	R_1	1,02	9,9	89,7
J_2	0,96	7,9	87,8	N_2	1,15	10	88,5	R_2	1,04	9,2	88,7
J_3	1.09	9,0	88,0	N_3	1,66	15,6	89,3	R_3	1,97	17,9	89,0
J_b	*0,94*	10,4	91,0	N_b	*1,27*	15,9	92,0	R_b	*1,90*	24,4	92,2
Total	3,89				5,16				5,93		

En milieu acide, en prenant comme unité la D. O. = 0,43

J_1	0,60	N_1	0,52	R_1	0,50
J_2	0,39	N_2	0,36	R_2	0,35
J_3	0,22	N_3	0,20	R_3	0,18
J_b	0,15	N_b	0,12	R_b	0,08

En milieu citro-ammoniacal, on a en prenant pour unité la D. O. égale à 0,70.

J_1	0,47	N_1	0,45	R_1	0,35
J_2	0,55	N_2	0,42	R_2	0,37
J_3	0,77	N_3	0,47	R_3	0,30
J_b	0,02	N_b	0,02	R_b	0,015

En sol plus humide, c'est encore la 3e feuille qui présente le plus d'écart de coloration en milieu ammoniacal.

Alors que le rapport des poids secs R_3/J_3 est égal à 1,80, le rapport des concentrations en pigments est $J_3/R_3 = 2,57$; de même on aurait $R_3/N_3 = 1,18$ pour les poids secs et $N_3/R_3 = 1,56$ pour les concentrations en pigment. Le rapport des poids secs des plantes totales sont $R/J = 1,52$ et $R/N = 1,15$.

L'apport d'engrais phosphaté modifie peu la teneur en eau de la plante (ne dépassant pas une unité), que le milieu soit humide comme ici ou plus sec comme dans l'expérience précédente.

Dans cette expérience, où le sol est plus humide et où les plantes ont été récoltées après trois journées chaudes, on observe une variation assez importante de concentration en pigments pour la feuille cotylédonaire.

c) **Influence de l'humidité du sol.**

Deux lots de terre ont été maintenus à 11 et 15 p. 100 d'humidité. Chaque lot contenait deux séries, l'une ayant reçu 0,3 g de phosphate bicalcique et l'autre 3 g pour 7 kg de terre.

Les plantes entières ont été broyées avec de l'acide trichloracétique. On a obtenu les résultats suivants : fig 3, (la concentration la plus forte étant égalée à 10).

	Eau % de matière verte	P_2O_5 mg par litre	Concentration en pigments solubles milieu acide					Poids sec de cent plantes	Indices de comparaison		
n	83	118	10	10			10	3,9	100		100
			↓	↓					↓		
N	85	125		8,4	10		8,4	5,7	146	100	↓
r	83	185	5,3		↓	10	5,3	5,6	100	↓	143
						↓			↓	↓	
R	86	221			4,0	6,3	3,4	9,5	170	166	

n correspond à 0,3 g de phosphate bicalcique par pot et 11 % d'eau
r — 3 g — 11 % —
N — 0,3 g — 15 % —
R — 3 g — 15 % —

L'apport supplémentaire d'eau a agi de la même façon que l'acide phosphorique puisqu'il augmente à la fois la concentration en P_2O_5,

diminue la coloration et élève la proportion d'eau de la plante. Il faut remarquer que, d'après d'autres résultats, la teneur en eau de l'orge peut passer de 81 à 92 p. 100 d'eau, alors que la variation due à un apport de phosphate est de l'ordre de 1 p. 100.

Les poids secs sont augmentés aussi bien par l'addition d'eau, que par l'apport de phosphate :

Par une seule addition d'eau, les indices passent de 100 à 146 avec 0,3 g de phosphate et de 100 à 170 avec apport de 3 g de phosphate.

Par seule addition de phosphate, les indices passent de 100 à

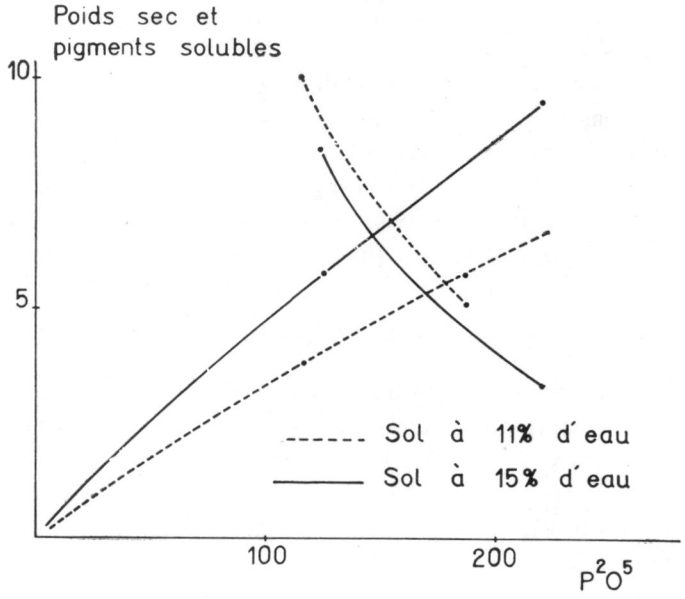


Fig. — III.

143 avec 11 p. 100 d'eau et de 100 à 166 avec 15 p. 100 d'eau. L'eau a donc augmenté l'efficacité de l'engrais phosphaté et à elle seule a produit une augmentation semblable à celle de l'engrais phosphaté.

On observe en même temps une baisse de la concentration en pigments relativement plus faible que l'augmentation correspondante du poids sec. Il s'agit de la plante entière, et il conviendra d'examiner l'influence de l'humidité sur la base et la 3e feuille.

Ces chiffres montrent l'importance de la teneur en eau sur la croissance de la plante. On voit combien il est illogique, dans les études sur la nutrition des plantes, de ne considérer que N, P, et K et de rapporter à la matière sèche.

d) Influence de l'acide phosphorique.

Les données précédentes montrent que les variations de matières colorantes les plus importantes se produisent :

Dans la 3e feuille en milieu citro-ammoniacal lorsque la plante a trois feuilles (la 4e sortant).

Dans la base de la plante lorsque la 4e est bien sortie.

Dans l'expérience suivante, on a étudié le rapport existant entre l'intensité de coloration des extraits de ces parties de la plante et le poids sec total de la plante.

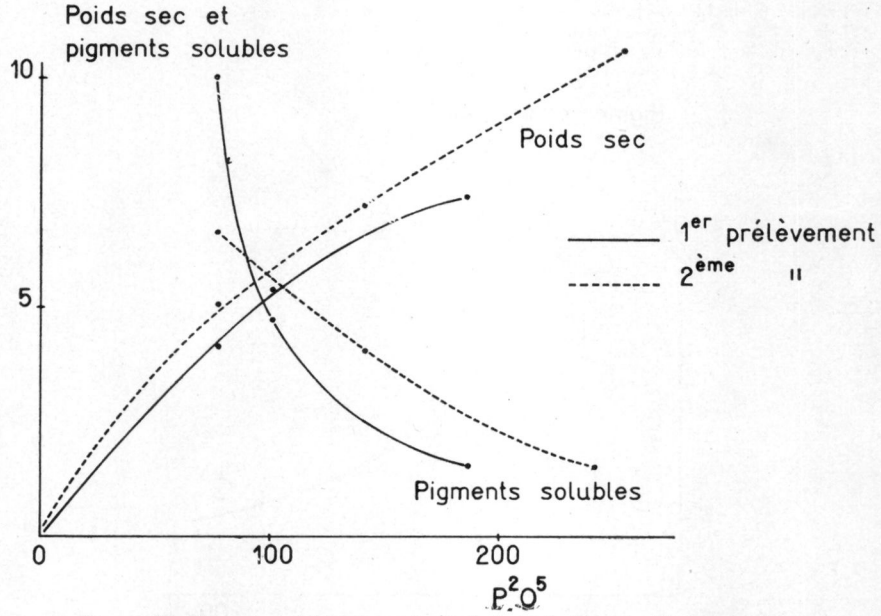


FIG. — IV. Pigments solubles des extraits de la 3e feuille en milieu ammoniacal.

L'humidité de la terre a été maintenue à 18 p. 100 et les doses de phosphate bicalcique ont été, par pot, 0,3 g pour le lot J, 0,75 g pour le lot N et 1,86 pour le lot R.

Pour comparer la concentration relative des divers lots, on a posé égale à 10 celle du lot J lors du 1er prélèvement pour la 3e feuille. Pour tracer les graphiques, on fait coïncider l'ordonnée 10 g du poids sec avec l'ordonnée 10 de concentration en pigments solubles ; les abscisses sont les concentrations en P_2O_5 (fig. 4, 5).

Lors du 1er prélèvement on a obtenu les résultats (voir tableau suivant).

En milieu citro-ammoniacal, la concentration de J est six fois et demi plus forte que celle de R, alors que le poids sec augmente de 1 à 1,77.

En milieu acide, la concentration de N est deux fois et demi plus

grande qu'en R alors que le poids sec augmente d'un peu plus d'un tiers (à ce stade de végétation, les D. O. sont très petites; la matière colorante a donc été concentrée par absorption sur alumine et élution par un volume plus petit d'acide trichloracétique 2 N; la loi de Beer est observée; on a indiqué les D. O. des liquides d'extraction ramenés de 10 à 5 cc).

	Eau %	Poids sec de cent plantes	Indices de comparaison		(1)		(2)		(3)
					D. O.	C	D. O.	C	
J	89,7	4,12	100				(1,0)	10	78
N	90,2	5,3	128	100	(0,07)	4,1	0,64	4,6	102
R	90,7	7,3	177	138	(0,03)	1,7	(0,32)	1,5	188

(1) Pigments solubles de la base en milieu acide.
(2) de la 3e feuille en milieu citro-ammoniacal.
(3) P_2O_5 de la 3e feuille par litre d'eau de la plante.

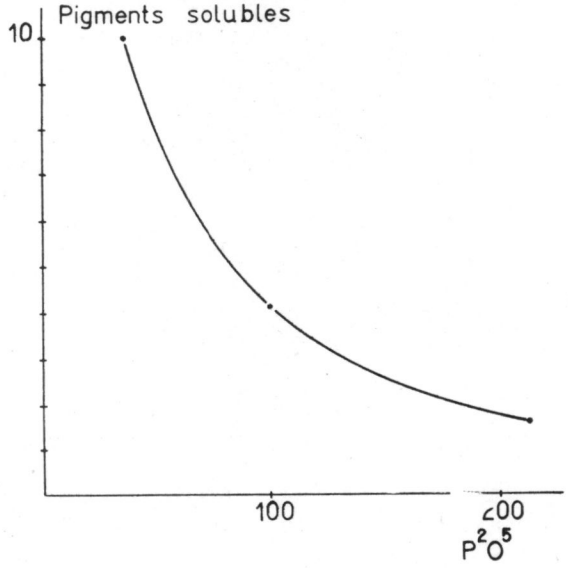


FIG. V. — Pigments solubles des extraits trichloracétiques de la base — (2e prélèvement)

Le deuxième prélèvement, fait cinq jours plus tard, a donné les résultats suivants :

	Eau %	Poids sec de cent plantes	Indices de comparaison		(1)		(2)		(3)	P_2O_5 de la base
					D. O.	C	D. O.	C		
J	90,2	5,08	100		(0,17)	10	0,80	6,6	79	36
N	91,3	7,1	139	100	(0,07)	4,1	0,56	4,0	143	99
R	91,6	10,6	208	149	(0,03)	1,7	0,32	1,5	254	212

(1) Matière colorante de la base, en milieu acide.
(2) Matière colorante de la 3e feuille, en milieu citro-ammoniacal.
(3) P_2O_5 de la 3e feuille par litre d'eau de la plante.

En milieu citro-ammoniacal l'intensité de la matière colorante varie dans la proportion de 1 à 4,5 et en milieu acide de six fois, alors que le poids sec double. L'examen de la courbe poids sec en fonction de la matière colorante montre que lorsque le poids sec augmente, cette proportion diminue, mais pour des valeurs assez faibles de la matière colorante, elle reste encore supérieure à celle de l'augmentation du poids sec ; ainsi pour le 2e prélèvement, lorsque le poids sec passe de 8 à 10 g, c'est-à-dire augmente de 100 à 125, l'intensité de la matière colorante passe de 3,4 à 1,75, c'est-à-dire de 194 à 100.

L'apparition d'une faible variation de la concentration en pigments solubles sera le signe que la richesse du sol en acide phosphorique a atteint une valeur au-dessous de laquelle il ne faut pas descendre. Bien qu'il n'en résulte aucune diminution de rendements en grains, il conviendra d'apporter des engrais phosphatés.

II. — EXPÉRIENCES AU CHAMP

Sur un champ dont certaines parcelles ont été épuisées au cours de plusieurs années et dont les autres ont reçu régulièrement des engrais phosphatés, on a semé de l'orge Kénia. Les résultats qui vont être donnés se rapportent à deux groupes de parcelles installés, l'un sur un terrain (parcelles 1 et 2) ayant 60 à 80 cm, l'autre de 30 cm de profondeur ; ce dernier plus argileux repose sur du calcaire fissuré (parcelles 5 et 6).

Un premier prélèvement a été fait le 9 mai après une période sèche. A cette époque, on trouve, pour les deux parcelles sans engrais phosphaté, que 68 p. 100 des plantes ont 4 feuilles, les autres ayant 3 feuilles et la 4e petite. Dans la parcelle 1, on trouve 63 p. 100 des plantes qui ont un talle et 13 p. 100 qui en ont 2; dans la parcelle 5, 17 p. 100 de plantes qui ont un talle, les autres n'en ayant pas.

Dans les parcelles ayant reçu un engrais phosphaté, il y a 80 à 85 p. 100 de plantes ayant 4 feuilles et environ 15 p. 100 de plantes en ayant 5. En 2 et en 6, il y a 75 p 100 des plantes qui ont un talle, quelques-unes ont un 2e talle.

	(1)	Eau %	(2)	Indices de comparaison	P_2O_5	(3)	(4)	(5)
Sans P_2O_5 1	62	85,4	9,0	100	206	0,20	0,65	1,0
Avec P_2O_5 2	83	85,3	12,3	136	473	0,15	0,44	0,55
Sans P_2O_5 5	53	83,5	8,6	100	209	0,22	0,64	1,0
Avec P_2O_5 6	73	84,0	11,7	136	463	0,17	0,49	0,65

(1) Matière verte de cent plantes
(2) Matière sèche de cent plantes
(3) D.O. en milieu acide
(4) D.O. eu milieu citro-ammoniacal
(5) Concentration relative

30 g de plantes entières ont été broyées avec 45 cc d'acide trichloracétique à 14 p. 100 et les D. O. des extraits mesurées.

Les résultats sont donc voisins pour les deux groupes de parcelles; toutefois les plantes contiennent un peu plus d'eau en 1-2 qu'en 5-6, ce qui ne peut être dû qu'à la différence de sol. Les graphiques (approximatifs pour les pigments) sont très voisins. (fig. 6)

Si les sols étaient identiques en 1-2 et en 5-6, on devrait dire que la teneur plus élevée en eau de la plante en 1-2 indique que les poids secs et les teneurs en $P_2 O_5$ auraient des valeurs moins élevées pour une teneur en eau égale à celle de 5-6 (voir l'expérience précédente sur l'humidité du sol); et les indices d'augmentation du poids sec seraient un peu diminué.

Mais la différence de sol se réduit-elle à une seule question d'humidité ?

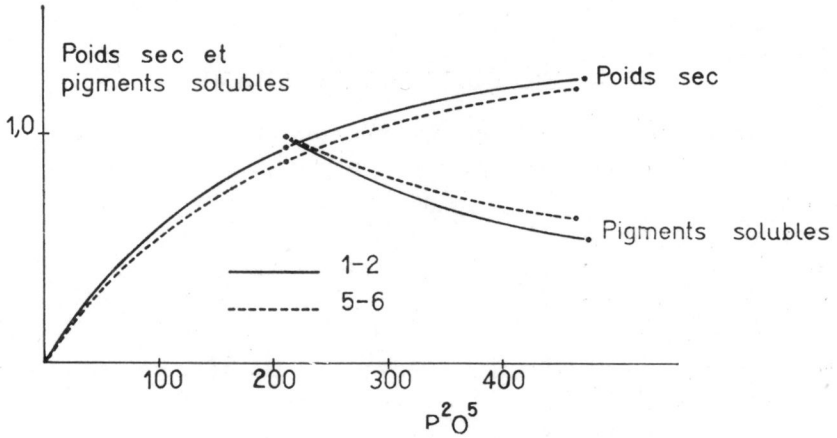


FIG. IV. — Expérience aux champs.

Un deuxième prélèvement a été fait le 22 mai après une période de pluie et a donné les résultats suivants :

	Matière verte de cent plantes	Eau %	Matière sèche de cent plantes	Indices de comparaison	D.O. en milieu acide
Sans P_2O_5 1.....	183	83,8	29,6	100	0,30
Avec P_2O_5 2.....	246	83,9	39,6	134	0,31
Sans P_2O_5 5.....	171	83,0	29,1	100	0,34
Avec P_2O_5 6.....	240	83,6	39,3	135	0,36

A ce stade de la végétation, les matières colorantes sont du même ordre ou un peu plus élevées dans les parcelles ayant reçu de l'acide phosphorique. On a remarqué que l'extrait de 2 paraît plus rouge que celui de 1 qui est orangé; par contre il n'y a pas de différence de teinte entre 5 et 6. Ces résultats sont nettement à l'opposé de ceux qu'on observe

chez les plantes plus jeunes. Toutefois on voit que les D. O. sont plus élevées en 5-6 qu'en 1-2.

Si au lieu de la plante entière, on prend les talles d'une part et les trois feuilles du haut de la tige d'autre part, on constate que l'extrait des talles sans acide phosphorique est moins coloré que celui des plantes non carencées; il en est de même, mais à un degré moindre pour les feuilles. L'interprétation à donner semble la suivante : les talles sont plus jeunes en cas de carence, et comme la coloration fonce avec l'âge, elle est plus forte chez les talles plus développés. On a obtenu les valeurs suivantes, qui n'ont porté que sur le groupe 5-6 :

	D. O.		D. O.
Talles	0,26	Feuilles 5	0,25
Talles 6	0,31	Feuilles 6	0,27

Les rendements en grains, obtenus à la moisson, ont été, en quintaux à l'hectare (résultats nettement significatifs) :

	Indice de comparaison		Indice de comparaison
1 23 q	100	5 19 q	100
2 25 q	108	6 23 q	121

Les résultats du 1er prélèvement indiquent une *espérance d'action* de l'engrais phosphaté, si les conditions postérieures sont favorables; ils sont en relation avec la richesse du terrain. Mais si, au cours du tallage et après celui-ci les conditions sont défavorables, le rendement en grains sera diminué au profit de la paille. Par suite du printemps et de l'été pluvieux, les plantes ont été dans des conditions d'humidité plus défavorables en 1-2 qu'en 5-6.

On notera en effet que, dans ces mêmes parcelles, les indices de comparaison étaient les mêmes en 1-2 et en 5-6, de l'ordre de 10 p. 100 environ, pour le blé qui a précédé l'orge.

III. — ETUDE DES PIGMENTS

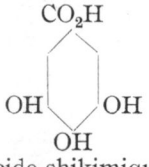
Les flavonoïdes sont caractérisés par la chaîne C_6-C_3-C_6 ;
la classification des flavonoïdes à l'intérieur des groupes principaux est basée sur la configuration et l'état d'oxydation de la partie C_3. En désignant par A et B les deux noyaux C_6, la constitution des principaux groupes de flavonoïdes est la suivante (2)

Catéchines A — CH_2 — CHOH — CHOH — B
Flavones A — CO — CH_2 — CO — B
Anthocyanines A — CH_2 — CO — CO — B.

La caractérisation des flavonoïdes individuels à l'intérieur de chaque groupe est basée sur la place des substituants et leur nature (hydroxyl, méthoxyl, glycosides).

La partie B-C_3 a comme précurseur l'acide shikimique ; l'acide déshydroshikimique, le précurseur immédiat de l'acide shikimique proviendrait de l'acide 2 céto-3 déoxy-7 phospho-D glucoheptonique, qui est formé par la condensation de D érythose-4 phosphate avec le phosphoénolpyruvate (3).

Le noyau A est formé par trois unités acétate, dont l'union se fait avec l'intervention de l'A. T. P. par une série de réactions (4).



acide shikimique

En milieu acide, l'intensité des pigments séparés par H Cl 2 N d'une part et par l'acide trichloracétique 2 N d'autre part diminue dans le même sens de la 1er à la 3e feuille et dans une proportion voisine. Pour la base des plantes la coloration générale est très faible lors du 1er prélèvement et on peut considérer que cette partie de la plante joue à ce moment surtout un rôle de dilution; lors des deux autres prélèvements, la coloration rose est la seule observée et peut être séparée en deux colorants roses : le plus important est extrait par l'acide trichloracétique 2 N, l'autre par H Cl 2 N ; les intensités baissent lorsqu'on passe de J à R.

Si l'on prend des solutions de ces pigments séparés de la façon dite plus haut et qu'on les traite par le citrate d'ammoniaque, on constate :

Que ceux absorbés par l'alumine et élués par H Cl 2 N deviennent jaune pâle.

Que ceux absorbés par l'alumine et élués par l'acide trichloracétique 2 N deviennent bruns.

Que le liquide non retenu par l'alumine se colore en brun.

En mesurant les D. O. de ces diverses fractions, on s'aperçoit aussi bien pour les substances extraites par l'acide trichloracétique 2 N que les substances traversant l'alumine, que les variations les plus importantes lors du 1er prélèvement sont celles constatées entre les extraits des 3e feuilles des plantes carencées et non carencées en acide phosphorique, les premières étant plus colorées.

On peut constater sur les colonnes, avant l'élution la présence des mêmes colorants dans tous les cas.

Si les divers pigments ont des concentrations qui varient dans le même sens, celles-ci ne sont cependant pas tout à fait proportionnelles. On s'en rend compte en diluant un extrait qui a une forte coloration, on n'obtient pas une teinte identique à celle d'un extrait très peu concentré. La comparaison des extraits colorés dans cette étude a principalement pour but de suivre la *variation de la coloration* afin d'obtenir la valeur de la dérivée

correspondant à une concentration donnée en acide phosphorique, c'est-à-dire comparer deux valeurs assez voisines.

Il résulte de cette séparation que le bas de la plante contient principalement, sinon exclusivement, un colorant rose en milieu acide et que la 3e feuille contient principalement des colorants bruns en milieu citro-ammoniacal. Dans les études ultérieures, ces deux déterminations seront utilisées pour suivre les réactions des plantes aux divers facteurs qui interviennent sur leur développement.

Il faut remarquer que les concentrations des réactifs d'extraction indiqués ci-dessus, pourront peut-être différer suivant les espèces et même les variétés étudiées.

L'isolement des pigments par chromatographie sur papier n'a pu être obtenu avec des extraits trichloracétiques, même après élimination de cet acide par l'éther ; on obtient une traînée sans discontinuité. Il faudra en chercher la cause et l'éliminer.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES ET CONCLUSIONS

Lorsque l'âge de la plante augmente, la courbe du poids sec et celle de la matière colorante s'élèvent; la concentration en acide phosphorique s'élève également.

Lorsque l'humidité du sol augmente, celle du poids sec s'élève, celle de la matière colorante s'abaisse et la concentration en acide phosphorique s'élève.

Un apport d'engrais azoté élève la courbe du poids sec, diminue l'intensité colorante et abaisse la concentration en acide phosphorique.

Il en résulte que la position des courbes du poids sec et de l'intensité colorante par rapport à la concentration en acide phosphorique reflète l'influence des diverses circonstances dans lesquelles se développe la plante. C'est la chaleur, la lumière, la nature et l'état physique du sol.

Il semble que la matière colorante puisse avoir une valeur plus ou moins élevée (qui est une valeur limite), lorsque le sol est largement pourvu en acide phosphorique, au même stade de la végétation, par exemple sous l'influence de l'humidité. Or le maximun de rendement en grains ne se produit ni pour une humidité insuffisante, ni pour une humidité excessive ; l'aptitude à donner des talles correspond à un optimum d'humidité qu'il faudra chercher à relier à la position des courbes et à leur valeur limite. Il faudra de même étudier l'influence de la densité de semis.

Des expériences de LONGCHAMP, ROY et GAUTHERET (8) étudiant l'action d'hétéroauxines sur la morphologie des céréales, il résulte que les traitements précoces réalisés avant le tallage, ne provoquent aucune altération de la morphologie des épis, mais que ceux faits dès le début

du tallage déterminent des déformations importantes, l'influence des traitements plus tardifs étant de moins en moins accusée. Or le tallage commence entre le stade 3e et le stade 4e feuille. C'est donc ce stade, où se dessine la formation des épis, qui doit être choisi de préférence pour le prélèvement, et l'examen portera sur l'intensité colorante en milieu citro-ammoniacal. Néanmoins, on pourra ultérieurement prélever la 4e feuille en utilisant le milieu ammoniacal, ou la base de la plante, lorsque la 4e feuille est à moitié développée, en faisant les mesures en milieu acide.

A la fin du tallage, l'examen portera sur les talles.

Pour des stades ultérieurs, il n'a pas été fait de déterminations, mais il conviendra d'étudier les feuilles les plus jeunes et la partie supérieure de la tige (1).

Pour connaître la richesse d'un terrain, il faut laisser une bande témoin sans engrais phosphaté ; en sol riche, on observera une variation nulle de la matière colorante et une variation notable de l'acide phosphorique. Une variation nulle de l'acide phosphorique indiquerait un sol ayant un pouvoir de fixation considérable. Si par suite d'un fort pouvoir de fixation, l'acide phosphorique variait peu, l'intensité colorante baisserait rapidement.

Pour un même lot, l'intensité colorante croît avec l'âge, pour les plantes non carencées. Donc, si au lieu de faire la récolte des plantes des différents lots le même jour, c'est-à-dire au même âge, elle était faite au même stade végétatif, les plantes des lots enrichis en acide phosphorique seraient récoltées les premières, leur intensité colorante serait plus faible, en sorte que la différence de coloration entre plantes carencées et non carencées serait plus grande. Prélever le même jour a l'avantage que toutes les plantes ont été soumises aux mêmes conditions extérieures ; autrement, si entre des prélèvements successifs, avait lieu un coup de chaleur, de froid, etc... la composition des plantes pourrait en être modifiée. Il faut du reste remarquer qu'un retard dans le développement est un signe de carence, qu'on ne doit pas négliger.

Le rôle des flavonoïdes est assez mal connu. Toutefois, la présence de groupes phénoliques, ainsi que la partie C_3 permettent d'attribuer aux flavonoïdes un rôle dans les processus d'oxydo-réduction (2).

Robinson (5) a remarqué que les pigments anthocyaniques s'accumulent aux endroits d'activité synthétique intense quand le transport des produits de la photosynthèse est empêché (cas de lésions) ou quand la plante est alimentée artificiellement avec des sucres et dans quelques cas de déficience d'azote. D'autres auteurs ont aussi montré l'influence des sucres sur la production des anthocyanes (Thimann et Edmusen, Blank,

(1) Lors d'un travail sur colza, on a constaté que, pour une fumure insuffisante en azote, l'extrait du haut de la tige, au début de la floraison, avait une coloration rose qui n'existait pas pour un apport plus élevé d'azote, C'est donc une partie de la plante à étudier.

Eddy et Mapson).C'est une observation courante que les feuilles de colza rougissent quand elle manquent d'azote.

D'autre part Paech et Eberhardt (6 et 7) ont montré avec le chou rouge que la formation de pigments anthocyaniques est accompagnée par une augmentation de l'intensité respiratoire.

On peut penser que des pigments flavonoïdes autres que les anthocyanes peuvent se former dans des circonstances analogues, mais n'apparaissent guère, étant jaune pâle dans le milieu acide des plantes qui les contiennent.

Lorsque la croissance de plantes est normale, les glucides produits par la photosynthèse sont utilisés pour former des protéines et les membranes cellulosiques des nouvelles cellules. Si cette utilisation se fait mal les glucides ne pouvant s'accumuler comme dans les tissus de réserve, suivraient une destination différente ; ils s'oxyderaient et parmi les produits d'oxydation, des flavonoïdes se formeraient.

C'est en prenant pour guide cette hypothèse, que des travaux ultérieurs pourraient approfondir le mécanisme qui relie l'augmentation des pigments solubles à la carence en acide phosphorique.

Ce travail a porté sur l'action de l'acide phosphorique sur les matières colorantes extraites par l'acide trichloracétique, ll devra être complété par d'autres déterminations. En particulier, il a été déjà établi que cet élément fertilisant avait sur les susbtances précipitables par l'acide phophotungstique, une influence analogue à celle qu'il a sur les matières colorantes, c'est une question qui sera reprise.

RÉSUMÉ

Les pigments solubles de l'orge jeune sont extraites par broyage dans de l'acide trichloracétique. On constate que leur concentration est influencée par plusieurs facteurs, notamment par la richesse du sol en acide phosphorique.

Lorsque la plante a trois feuilles, c'est la coloration de l'extrait de la troisième feuille en milieu ammoniacal qui est le test le plus sensible à la richesse du sol en acide phosphorique. Lorsque la quatrième feuille est à moitié développée, c'est celle de la base de la plante en milieu acide, qui doit être mesurée ; lorsque la cinquième feuille sort, il faut examiner l'extrait de la quatrième feuille en milieu ammoniacal.

A la fin du tallage, c'est l'extrait des talles, dont il faut se servir ; la variation est alors inverse, en milieu acide, de celle observée lors des stades antérieurs.

Une augmentation de l'humidité du sol accroît la concentration en

acide phosphorique de la plante et diminue la coloration de son extrait.

On a pu séparer les pigments solubles en les absorbant sur de l'alumine ; l'élution se fait avec l'acide trichloracétique 2 N et l'acide chlorhydrique 2 N.

SUMMARY

Phosphorus deficiency and concentration of flavonols.

The colouring materials were extracted from young barley by trituration in trichloracetic acid. The intensity of colour seemed to be affected by several factors, especially by the levels of phosphorus in soil.

In a plant with three leaves, the most sensitive test for soil-phosphorus levels is the colour intensity of the extract from the third leaf in ammoniacal medium. When the fourth leaf is half developed, the basal leaf of the plant should be studied in acid medium, while after the appearance of the fifth leaf, it is the extract from the fourth leaf which should be examined in ammoniacal medium.

The extract of tillers should be used at the end of tillering ; the variations observed in acid medium are here inverse to those during the preceding stages.

Increasing soil moisture increases the phosphorus concentration in the plant and decreases the colour intensity of the plant extract.

The colouring materials were separated by absorption on alumina and extraction with 2 N trichloracetic acid and hydrochloric acid.

ZUSAMMENFASSUNG

Phosphorsäuremangel und Flavonoidenkonzentration.

Die Farbstoffe der jungen Gerste werden, nach Zerkleinerung, durch Trichloressigsäure extrahiert. Man stellt fest, dass die Farbstärke durch mehrere Faktoren beeinflusst wird, besonders durch den Phosphorsäurengehalt des Bodens.

Wenn die Pflanze drei Blätter hat, ist die Farbstärke des Extraktes des dritten Blattes in Ammoniak der empfindlichste Test in Bezug zum Phosphorsäurengehalt des Bodens. Wenn das vierte Blatt halb entwickelt ist, muss der Extrakt des unteren Teils der Pflanze in saurer Lösung gemessen werden ; wenn das fünfte Blatt herauskommt, muss der Extrakt des 4. Blattes in ammoniakalischer Lösung untersucht werden.

Am Ende der Bestockung, muss der « Stockextrakt » benützt werden ; die Veränderungen sind dann umgekehrt, in saurer Lösung denen in den früheren Stadien beobachteten Veränderungen.

Wenn die Bodenfeuchtigkeit grösser wird, steigt die Phosphorsäurekonzentration in der Pflanze und die Farbstärke der Extrakte sinkt.

Die Farbstoffe konnten durch Adsorption auf Aluminiumoxyd getrennt werden ; die Elnierung wird mit Trichloressigsäure 2 N und Salzsäure 2 N durchgeführt.

Фосфорный голод и концентрация флавоноидов.

ГАМИ. Шатору.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Красящие вещества молодого ячменя извлечены толчением в трихлоруксусной кислоте. Устанавливается, что интенсивность окрашивания находится в зависимости от многих причин, в частности, она зависит от богатства почвы в фосфорной кислоте.

Когда растение имеет три листа, наиболее чувствительным указателем богатства почвы в фосфорной кислоте является интенсивность окраски экстракта третьего листа в аммиачной среде. Когда четвертый лист развит наполовину, то нужно измерять экстракт основания растения в кислой среде; когда выходит пятый лист, нужно осматривать экстракт четвертого листа в аммиачной среде.

В конце кущения, нужно пользоваться экстрактом ответвлений; тогда вариация обратна той, в кислой среде, что наблюдалась в предыдущих фазах.

Увеличение влажности в почве увеличивает концентрацию фосфорной кислоты в растении и уменьшает интенсивность окраски его экстракта.

Оказалось возможным изолировать красильные вещества, поглощая их окисью алюминия; растворение производится 2 N трихлоруксусной кислотой и 2 N хлорной кислотой.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) Hamy. — *Annales agronomiques*, p. 467, 1957.
(2) Geissmann. — In Modern Methoden Pflanzenanalyse de Paech et Tracey.
(3) Robinson, Srinivasan et autres. — *J. Am. Chem. Soc.*, **77**, 4 953, 1955 et *J. Biol. Chem.*, **223**, 913, 1956.
(4) Birch et Donovan. — *Australien J. Chem.*, C. 360, 1953.
(5) Robinson. — *Nature*, **137**, 172, 1936.
(6) Paech et Eberhardt. — Zeit Naturforsch 7 b 664, 1952.
(7) Eberhardt. — *Planta*, **43**, 253, 1954.
(8) Longchamp, Roy et Gautheret. — Annales de l'Amélioration des plantes, p. 305, 1951.

633. 41 : 631. 84 : 631. 816. 2 : 631 559

ESSAI SUR L'INFLUENCE DE LA DATE D'APPORT DES ENGRAIS AZOTÉS SUR LE RENDEMENT DE BETTERAVES SUCRIÈRES

DÉVELOPPEMENT VÉGÉTATIF ET MARCHE DE L'ABSORPTION D'AZOTE

PAR

G. LEFÈVRE, G. HIROUX (*)

Station d'Agronomie, Amiens.

PLAN DU MÉMOIRE

PREMIÈRE PARTIE

Introduction.

Expérimentation sur l'influence de la date d'apport des engrais azotés.

1. — Dispositif expérimental.
   Mesure des résultats.
2. — Conditions climatiques.
3. — Résultats.

DEUXIÈME PARTIE

Développement végétatif et absorption de l'azote.

1. — Production de matière verte.
2. — Production de matière sèche :
   — variation de la teneur en matière sèche ;
   — production ha.
3. — Remarques.
4. — Marche de l'absorption de l'azote.

Conclusions.

(*) Avec la collaboration technique de Melle CAILLOUET.

INTRODUCTION.

Des essais antérieurs, menés en Belgique pendant plusieurs années et répétés dans notre région en 1957, ont montré l'intérêt que peut présenter, dans la culture de la betterave sucrière, une fumure azotée minérale précoce. A côté de l'influence technique de ce traitement — nommé parfois en profondeur parce que, fourni avant labour, il doit se traduire par une fumure plus profonde — il peut en effet avoir des avantages économiques et industriels en permettant d'étaler, sur une plus grande période, les dates de livraison de l'engrais azoté.

L'expérience belge, poursuivie pendant huit années, s'était terminée en 1956 (1) sur des conclusions qui ne laissaient pas prévoir, en moyenne, une amélioration du rendement mais indiquant que si on y trouvait un avantage pratique — comme de soulager, par exemple, les travaux de printemps — on pouvait employer cette technique sans dommage, à condition de réserver, pour le printemps, au moins un quart de la fumure azotée totale.

Par contre, l'essai réalisé en 1957, dans le département de la Somme, par la Sucrerie d'Eppeville, suggérait un net avantage de la fumure précoce. Ceci n'était pas surprenant, en soi, puisque les premiers résultats belges avaient donné lieu parfois aux mêmes conclusions. L'effet de ce traitement doit donc être suivi, encore plus que tout autre, en notant scrupuleusement toutes les conditions culturales et climatiques qui l'accompagnent.

Il nous a donc semblé nécessaire de recommencer localement des essais en vue d'essayer de relever, par l'analyse des végétaux, les modifications que pourraient entraîner ces traitements. C'est pourquoi, en accord avec le S. P. I. E. A. et le C. E. T. A. d'Albert, un essai de fumure précoce a été réalisé à Allonville chez M. Van de Kerchove auquel nous adressons encore tous nos remerciements.

PREMIÈRE PARTIE

EXPÉRIMENTATION SUR L'INFLUENCE DE LA DATE D'APPORT DES ENGRAIS AZOTÉS

1. — Dispositif expérimental. Mesure des résultats.

Cet essai a été réalisé sur un sol n'ayant pas reçu de fumier car dans de nombreux cas, cet apport constitue un grave facteur d'hétérogénéité.

Le plan d'essai, à la suite des résultats belges, était compliqué par un apport de surface, localisé de part et d'autre de la ligne des jeunes

betteraves. Si bien que le schéma définitif, avec les dates effectives de traitement, a été le suivant :

	Date	Fumure	Unités/ha									
	Septembre 57	phosphatée potassique	150 unités de P_2O_5 des scories 240 unités du chlorure de potassium									
Avant labour.....	13 Décembre	Azotée	150	150	75	75	0	0	150	150	75	75
Labour	15 Décembre											
Reprise des terres...	15 Mars	Azotée	0	0	75	75	150	150	75	75	150	150
Semis.....	24 Mars											
Démariage	15-20 Mai											
Azote localisé	21 Mai	Azotée	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0
		Total N	165	150	165	150	165	150	240	225	240	225

Tout l'azote a été apporté sous forme d'ammonitrate.

Le sol avait la composition suivante :

Cailloux	40	
Argile	123	
Limon	198	
Sables fins	648	Donc sol de limon léger bien pourvu en matières organiques riche en acide phosphorique moyen en potasse.
Sables grossiers	4	
Matières organiques	23,5	
Calcaire	0,4	
pH	7,1	
N	1,26	
P_2O_5 (Oxalate).....	0,21	
K_2O (échangeable)	0,18	

Pour suivre l'effet du traitement, des prélèvements ont été faits tous les quinze jours en vue de mesurer, d'une part, les variations de poids des feuilles et des racines, et d'autre part, d'évaluer, à chaque fois, la quantité d'azote prélevée dans chaque cas.

Ces prélèvements ont été réalisés de la façon suivante :

Pour les premiers prélèvements, il a été pris, dans chaque parcelle, 3 fois dix betteraves placées dans les conditions normales de végétation, c'est-à-dire sans manque sur la ligne choisie ni sur les deux lignes voisines. A mesure que la végétation augmentait il devenait difficile de faire d'aussi gros prélèvements qui furent, pour cette raison, ramenés à 3 fois 5 betteraves. Comme il y avait en fait, avec les témoins, douze traitements, chaque prélèvement représentait $3 \times 5 \times 12 = 180$ betteraves. Il est certain que ces prises d'échantillons sont relativement faibles pour chaque parcelle mais nous pensions que ce défaut pouvait être compensé par la fréquence des répétitions dans le temps.

Le dernier prélèvement, celui de la récolte, a été fait sur trois fois dix mètres, en notant le nombre de betteraves récoltées.

Auparavant, la longueur de la raie, nécessaire pour avoir les 5 ou 10 betteraves, était notée, afin de pouvoir ramener les mesures à un tonnage /ha.

Malgré les précautions prises, il a fallu constater des variations inexplicables, d'une prise d'échantillon à sa voisine, distante de quinze jours. Les résultats obtenus le 18 septembre, par exemple, donnent un classement très différent de celui qui résulte des pesées du 2 octobre et du 14 octobre. C'est pourquoi il est nécessaire d'être très prudent dans l'interprétation des différences observées entre les traitements de cet essai.

Étant donné que certaines parcelles ont donné le maximum de rendement, le 18 septembre, il a paru logique, pour présenter les résultats de récolte, de faire la moyenne des trois dernières pesées.

Malgré cela il reste 2 résultats très nettement aberrants.

Il s'agit de la récolte du 18 septembre pour le traitement 150-75-0 et de celle du 14 octobre pour le traitement 150-0-15. Nous les avons retirés des moyennes.

2. — Conditions climatiques.

Les conditions climatiques qui ont accompagné le développement des betteraves sont résumées par les données du tableau I. Nous avons

TABLEAU I. — *Données climatiques.*

	N° de jours depuis le semis	Pluies mm	Température moyenne	Somme des températures
Septembre		110		
Octobre		15		
Novembre		30		
Décembre		57		
Janvier		49		
Février		81		
Mars 24		12		
		244,0		
24 Mars	0		10,82	0
Avril		93,6 (17,5 / 33,5 / 42,6)	8,28	
19 Mai	56			
		49,1	14,84	
4 Juin	72			850,6
		13,2	16,68	
17 Juin	85			1 067,5
		57,6	16,18	
2 Juillet	100			1 310,2
		21,2	18,64	
16 Juillet	114			1 571,2
		29,2	17,85	
30 Juillet	128			1 821,1
		70,0	18,05	
13 Août	142			2 073,8
		36,1	17,68	
27 Août	156			2 321,3
		84,3	19,24	
18 Septembre	178			2 744,7
		19,0	15,71	
2 Octobre	193			2 964,7
		16,8	13,70	
14 Octobre	205			3 129,2
		734,1		

ramené les observations aux intervalles de temps séparant les divers prélèvements afin d'avoir, chaque fois, des mesures pour les périodes considérées.

3. — Résultats.

Les rendements indiqués (tableaux II et III), s'appliquent à des betteraves décolletées vraiment au ras du collet, en vue d'analyser, séparément, les racines et l'ensemble du bouquet foliaire.

Les résultats peuvent donner lieu aux commentaires suivants :

a) Pour 5 traitements le poids le plus élevé a été obtenu le 18 septembre.

Pour 3 traitements le poids le plus élevé a été obtenu le 2 octobre.

Pour 2 traitements le poids le plus élevé a été obtenu le 14 octobre, sans que ce classement puisse être effectivement lié à la date d'apport des engrais azotés.

b) Les traitements avant l'hiver ont eu à la récolte le plus grand nombre de pieds. Par contre, les fumures fournissant moitié avant l'hiver, moitié au printemps, ont nettement le nombre le plus faible. L'ensemble du champ d'essai a été démarié par les mêmes bineurs et il faudrait vraisemblablement chercher, dans des différences de la vigueur des pieds au moment du démariage, une explication à cette anomalie du nombre de pieds restants.

L'amplitude de variation entre les comptages de pieds des divers prélèvements d'un même traitement est moins importante que celle des poids.

c) Sur la moyenne des trois dernières pesées le rendement le plus élevé (55,117 T.) a été obtenu par le traitement fournissant 150 kg d'azote tout à la reprise des terres, c'est-à-dire le traitement habituellement utilisé dans cette exploitation. Tout de suite après viennent les traitements fournissant 150 kg d'azote, moitié avant le labour, moitié à la reprise des terres, avec ou sans localisation au démariage (54,8 et 54,6). Ensuite, le traitement 150 avant labour, 75 à la reprise des terres. On peut donc souligner que les formules fournissant 225 ou même 240 unités/ha n'ont pas donné plus que celles à 150 unités seulement. Toujours en descendant, on arrive au traitement 150 tout avant labour avec 53,290 T., soit moins de 2 tonnes de moins que le rendement maximum. Le rendement minimum 48,3 T. a été obtenu par le même traitement que celui du rendement maximum auquel avait été adjoint 15 kg en localisation.

Ces résultats sont loin d'être significatifs. Il suffit en effet de signaler que l'amplitude sur les moyennes des traitements va de 48 T. 3 à 55 T. 1 alors que la variation interne du rendement optimum a été de 48 T. 2 à 59 T. 1, et celle du traitement fournissant tout l'azote au labour de 47,2 à 59,1.

On ne peut donc pas mettre en évidence l'avantage d'une fumure par rapport à une autre, ni même d'une fumure à 240 unités sur celle à 150.

TABLEAU II

Rendements en Racines suivant le traitement N 150 *ou* 165.

Azote Avant labour..... Reprise des terres. Localisé.....	150 0 15		150 0 15		75 75 15		75 75 15		0 150 15		0 150 15	
Dates	Nbre ha	Poids kg	Nbre ha	Poids kg	Nbre ha	Poids kg	Nbre ha	Poids kg	Nbre ha	Poids kg	Nbre ha	Poids kg
18 Septembre	78 100	51 040	96 100	53 520	57 900	55 210	62 500	59 790	61 000	45 120	70 100	59 110
2 Octobre	70 100	47 100	75 400	47 200	60 700	56 009	61 600	49 300	62 500	52 080	75 400	48 200
14 Octobre	63 190	38 960	72 912	59 160	60 413	53 120	55 552	54 720	57 635	47 770	68 054	56 040
	74 100	49 070	81 471	53 204	59 671	54 807	59 884	54 603	60 378	48 323	71 184	55 117

TABLEAU III

Rendements en Racines suivant le traitement N 225 *ou* 240.

Azote Avant labour ..... Reprise des terres ..... Localisé	150 75 15		150 75 0		73 150 15		75 150 0	
Dates	Nbre /ha	Poids kg	Nbre /ha	Poids kg	Nbre /ha	Poids kg	Nbre /ha	Poids kg
18 Septembre	75 400	49 740	71 100	30 330	73 600	55 390	65 500	58 020
2 Octobre	75 400	53 700	69 100	57 600	60 020	49 700	63 600	49 100
14 Octobre	71 523	54 370	65 274	51 520	58 330	51 750	61 802	50 620
	74 108	52 603	67 187	54 560	68 993	52 280	63 634	51 580

d) La conclusion précédente paraît donc négative, puisqu'en fait on pourrait la résumer de la façon suivante : la date des apports, ainsi que leur emplacement, n'ont pas eu d'importance.

Si l'on reprend les conditions climatiques dans lesquelles ces résultats ont été obtenus, c'est-à-dire au cours d'une année plutôt pluvieuse, puisque les chutes de pluie dépassent la moyenne générale obtenue sur 25 ans, en juin (86 mm contre 53) en août (123 mm contre 69) et septembre (86 mm contre 58). Il apparaît, au contraire, que ces résultats donnent une grande latitude dans les dates d'apport de la fumure azotée, car inversement on ne peut dire qu'une certaine fumure a donné des résultats nettement inférieurs.

Il semblerait aussi que l'année aurait dû être défavorable à une fu-

mure dite profonde. Cela n'est d'ailleurs pas certain car les pluies plus importantes du mois de juin se sont produites dans une période ou la formation importante de matière sèche devait être capable d'absorber par évapo-transpiration les chutes de pluie. Par contre, une année sèche aurait dû être plus sûrement favorable à la fumure profonde.

Dans ces conditions, sans pouvoir préconiser une date d'apport plutôt qu'une autre, ce qui rejoint pour cette année la conclusion belge obtenue sur 8 ans, il peut être, au contraire, laissé une grande latitude dans les dates d'apport, ce qui en pratique permettrait de placer la fumure quand les conditions actuelles seraient les meilleures pour étaler le travail du printemps.

c) Sans entrer dans le détail, il faut également bien spécifier que cet essai a été fait sans apporter de fumier (ou de matières organiques). D'autres essais dans le département et les départements limitrophes, réalisés par le S. P. I. E. A. (2), laissent supposer qu'en présence de fumier les apports précoces sont plus efficaces. Cela se comprend d'autant mieux qu'on a affaire à des fumiers plus ou moins bien décomposés et conservés, capables d'absorber, pour leurs besoins propres, l'azote minéral fourni en hiver, et de le restituer en été. Il resterait donc à faire une expérimentation, assez complexe, en vue de vérifier ce point très important de l'influence des fumures organiques.

Ces résultats, plutôt décevants, pour l'utilité du dispositif mis en expérience, nous autorisent cependant à mélanger tous les traitements pour obtenir un reflet du développement général du champ. Chacun des dix prélèvements ayant été analysé à part, il semble que les résultats, s'appliquant, par leur moyenne, à des prélèvements de 150 betteraves, sont plutôt obtenus avec un excès de précautions puisque répétés en quelque sorte 10 fois.

DEUXIÈME PARTIE

DÉVELOPPEMENT ET ABSORPTION DE L'AZOTE

Ayant analysé tous les échantillons des divers prélèvements, nous présentons, dans le tableau IV, les données permettant de vérifier que, dans le cas de notre essai, les différences de développement et d'absorption de l'azote, dues à un apport localisé, ne sont pas considérables. En début de végétation le développement foliaire et la consommation d'azote sont plus importants pour ces traitements localisés. Dès le 30 juillet ces différences s'atténuent ; c'est pourquoi le développement de la matière verte et de la matière sèche, ainsi que l'absorption d'azote, seront étudiés d'après le résumé de ces résultats rassemblés dans le tableau V et schématisés par les figures 1 et 2.

TABLEAU IV. — *Marche du développement et de l'absorption d'Azote. Traitements localisés on non.*

	Feuilles					Racines						Racines + Feuilles		
	M. S. %	N % sec	M. V. kg/ha	M. S. kg/ha	N kg/ha	M. S. %	N % sec	M. V. kg/ha	M. S. kg/ha	N kg/ha	D	M. V. kg/ha	M. S. kg/ha	N kg/ha
Semis 24 mars														
1er Prélèvement 19 mai														
4 Juin :														
Non localisés	7,31	4,34	1 522	111	4,9	10,74	2,67	127	13,7	0,37		1 649	125	5,3
Moyenne générale	*7,36*	*4,32*	*1 609*	*117,6*	*5,1*	*10,64*	*2,60*	*137*	*14,7*	*0,38*		*1 746*	*132*	*5,5*
Localisés	7,41	4,30	1 696	124,2	5,3	10,54	2,53	148	15,6	0,39		1 844	139	5,7
17 Juin :														
Non localisés	8,75	3,86	8 898	780,6	30,3	12,94	2,19	1 506	195,6	4,30		10 404	976	34,6
Moyenne générale	*8,55*	*3,95*	*9 497*	*811,0*	*32,1*	*12,82*	*2,20*	*1 542*	*197,0*	*4,35*		*11 039*	*1 008*	*36,5*
Localisés	8,36	4,04	10 096	841,4	33,9	12,70	2,21	1 578	198,6	4,41		11 674	1 040	38,3
2 Juillet :														
Non localisés	8,49	3,16	25 190	2 124	67,0	12,6	1,71	5 854	742	11,6		31 044	2 866	78,6
Moyenne générale	*8,22*	*3,26*	*26 923*	*2 120*	*69,2*	*12,8*	*1,65*	*6 237*	*796*	*13,2*		*33 160*	*2 916*	*82,4*
Localisés	7,95	3,36	28 656	2 116	71,3	13,0	1,58	6 620	850	14,8		35 276	2 966	86,1
16 Juillet :														
Non localisés	9,46	2,28	38 806	3 500	79,5	15,39	1 052	15 718	2 427	25,36		54 524	5 927	104,86
Moyenne générale	*10,06*	*2,30*	*39 604*	*3 921*	*90,3*	*15,56*	*1 056*	*15 462*	*2 411*	*25,26*		*55 066*	*6 336*	*115,56*
Localisés	10,65	2,32	40 402	4 342	101,1	15,73	1,06	15 206	2 396	25,16		55 608	6 738	126,26
30 Juillet :														
Non localisés	8,50	2,78	56 916	4 836	129,9	16,28	1,02	24,432	4 000	41,5		81 348	8 836	171,4
Moyenne générale	*8,92*	*2,65*	*55 027*	*4 895*	*127,3*	*16,61*	*0,99*	*25 623*	*4 281*	*42,8*		*80 650*	*9 176*	*170,1*
Localisés	9,34	2,52	53 138	4 954	124,7	16,94	0,96	26 814	4 562	44,2		79 952	9 516	168,00
13 Août :														
Non localisés	8,65	2,48	64 042	5 488	136,2	16,14	1,10	32 818	5 324	57,7		96 860	10 812	193,9
Moyenne générale	*8,645*	*2,62*	*63 045*	*5 418*	*141,1*	*15,76*	*1,07*	*33 122*	*5 236*	*55,3*		*96 167*	*10 654*	*196,4*
Localisés	8,64	2,76	62 048	5 348	146,6	15,38	1,04	33 426	5 148	52,9		95 474	10 496	199,5
27 Août :														
Non localisés	9,67	2,22	59 692	5 760	126,8	15,98	0,98	40 290	6 484	62,4	6,60	99 982	12 244	189,2
Moyenne générale	*9,85*	*2,26*	*61 218*	*6 022*	*135,6*	*16,32*	*0,93*	*42 003*	*6 875*	*62,9*	*6,61*	*103 221*	*12 897*	*198,5*
Localisés	10,03	2,30	62 744	6 284	144,4	16,65	0,88	43 716	7 266	63,5	6,63	106 460	13 550	207,9
18 Septembre :														
Non localisés	9,34	2,55	62 500	5 800	147	18,69	0,98	51 554	9 704	95	7,30	114 054	15 504	242,0
Moyenne générale	*9,23*	*2,56*	*64 910*	*5 966*	*152*	*18,21*	*0,93*	*51 427*	*9 388*	*87*	*7,18*	*116 337*	*15 354*	*239,5*
Localisés	9,13	2,57	67 320	6 132	157	17,74	0,88	51 300	9 072	80	7,06	118 620	15 204	237,0
2 Octobre :														
Non localisés	9,76	2,57	55 420	5 377	138,4	19,06	0,86	50 280	9 548	81,2	7,77	105 700	14 925	219,6
Moyenne générale	*9,39*	*2,49*	*54 440*	*5 086*	*127*	*18,52*	*0,89*	*51 007*	*9 437*	*83,5*	*7,73*	*105 447*	*14 523*	*210,6*
Localisés	9,02	2,41	53 460	4 796	115,9	18,02	0,92	51 734	9 326	85,8	7,69	105 194	14 122	201,7
18 Octobre :														
Non localisés	9,86	2,55	44 942	4 388	111,7	19,31	0,95	54 813	10 622	100,2	7,72	99 755	15 010	211,9
Moyenne générale	*9,62*	*2,57*	*43 560*	*4 159*	*107*	*19,16*	*0,95*	*52 003*	*9 986*	*94,8*	*7,70*	*95 563*	*14 145*	*201,9*
Localisés	9,38	2,59	42 178	3 930	102,4	19,01	0,95	49 194	9 350	89,4	7,68	91 372	13 280	191,8

1. — Marche de la production de matière verte.

a) Feuilles.

Le poids de matière fourni après 56 jours est négligeable puisque la production totale, racines plus feuilles, n'atteint à cette époque que 175 kg/ha. Après 72 jours, où la production est de 1 600 kg, les chiffres, donnant les différences de poids relevés tous les quinze jours, indiquent qu'il se forme dans la première quinzaine de juin 7 900 kg de matière verte, puis à partir du 17 juin 17 400 kg, 12 700 kg, 16 400 kg tous les quinze jours. Du 30 juillet au 13 août la production redescend à 8 000 kg pour s'arrêter pratiquement. Le graphique met bien en évidence cette période allant du 4 juin (72e jour après le semis) au 13 août (140e jour). Le développement foliaire s'est donc réalisé, cette année et pour cette variété (Élite Le Peuple) (Type N) en 68 jours. La masse totale de feuilles produites, soit 63 tonnes, représente donc en moyenne une production journalière d'un peu moins de 1 t/ha, quantité dépassée dans la période allant du 17 juin, 85e jour, au 30 juillet, 128e jour.

TABLEAU V

Production de Matière verte,
Matière sèche et consommation d'Azote entre les divers prélèvements.

Semis	Jours	Matière verte			Matière sèche			Azote		
		Feuilles	Racines	Total	Feuilles	Racines	Total	Feuilles	Racines	Total
24 Mars .	0									
19 Mai ..	56			*175*						
		1 500		1 575						
4 Juin .	72	*1 610*	*140*	*1 750*	*118*	*15*	*133*	*5*	*0,4*	*5,4*
		7 890	1 400	9 290	693	182	875	27	3,6	30,6
17 Juin .	85	*9 500*	*1 540*	*11 040*	*811*	*197*	*1 008*	*32*	*4*	*36*
		17 400	4 660	22 060	1 309	603	1 912	37	9	46
2 Juil. .	100	*26 900*	*6 200*	*33 100*	*2 120*	*800*	*2 920*	*69*	*13*	*82*
		12 700	9 300	22 000	1 780	1 600	3 380	21	12	33
16 Juil. .	114	*39 600*	*15 500*	*55 100*	*3 900*	*2 400*	*6 300*	*90*	*25*	*115*
		16 400	10 100	25 500	1 000	1 900	2 900	37	18	55
30 Juil. .	128	*55 000*	*25 600*	*80 600*	*4 900*	*4 300*	*9 200*	*127*	*43*	*170*
		8 000	7 500	15 500	500	900	1 400	14	12	26
13 Août .	142	*63 000*	*33 100*	*96 100*	*5 400*	*5 200*	*10 600*	*141*	*55*	*196*
	"	− 1 800	8 900	7 100	600	1 700	2 300	− 5	8	3
27 Août .	156	*61 200*	*42 000*	*103 200*	*6 000*	*6 900*	*12 900*	*136*	*63*	*199*
		3 700	8 400	13 100	0	2 500	2 500	16	24	40
18 Sept...	178	*64 900*	*51 400*	*116 300*	*6 000*	*9 400*	*15 400*	*152*	*87*	*239*
		− 10 500	− 400	− 10 900	− 1 000	0	− 1 000	− 25	− 4	− 29
2 Oct. .	193	*54 400*	*51 000*	*105 400*	*5 000*	*9 400*	*14 400*	*127*	*83*	*210*
		− 10 900	1 000	− 9 900	− 850	600	− 250	− 20	12	− 8
14 Oct. .	205	*43 500*	*52 000*	*95 500*	*4 150*	*10 000*	*14 150*	*107*	*95*	*202*

b) Racines.

Pour les racines on observe évidemment un décalage. Après une période de démarrage allant du 17 juin au 2 juillet, il y a un développe-

ment régulier du 2 juillet au 18 septembre, période allant donc du 100e jour au 178e, au cours de laquelle 45 200 kg de racines ont été produites. Ce développement régulier représente donc environ 580 kg/jour.

c) **Total.**

La marche de la croissance totale s'étale du 4 juin au 18 septembre, soit du 72e jour au 178e jour.

2. — Marche de la production de matière sèche.

Variation de la teneur en matière sèche.

Si l'on se rapporte au tableau IV on voit que la teneur en matière sèche des feuilles ne varie pas, dans cet essai, d'une façon continue. Partant de 7,36 au premier prélèvement elle atteint un maximum au 16 juillet avec 10,06 p. 100 et en fin de végétation 9,62. Cela peut s'expliquer en partie par une combinaison de la répartition des pluies avec le développement végétal. Par exemple, du 2 juillet au 16 juillet et il ne s'est fait que 12 700 kg de matière verte avec 21,2 mm de pluie et du 17 juillet au 30 juillet 16 400 kg avec 29 mm.

Par contre, l'augmentation de la matière sèche des racines est continue et après avoir atteint au 18 septembre le maximum de matière verte, le pourcentage de matière sèche passe au cours du mois suivant de 18,21 à 19,16.

La traduction de la croissance de la matière verte à la matière sèche modifie peu les conclusions déjà énoncées.

Pour les feuilles la production de matière sèche semble cependant devoir être prolongée jusqu'au 27 août.

Pour les racines il n'y a pas de modifications.

La production journalière de la période allant du 17 juin au 18 septembre (14 400 kg pour 93 jours) dépasse donc 150 kg/ha par jour.

Depuis le semis, jusqu'à la récolte, le sol a reçu 490 mm et au cours de la période hivernale 244 mm (total 734 mm). Si l'on prend le chiffre, habituellement admis (3), pour les betteraves, de 377 kg d'eau évaporée par kg de matière sèche récoltée, on arrive pour les 15 400 kg de matière sèche élaborés à 5 800 T. d'eau, soit 580 mm. Les chutes de pluie reçues au cours de la végétation étaient donc insuffisantes mais les réserves fournies par l'année culturale étaient nettement suffisantes.

3. — Remarques.

Sur le graphique (I) on peut remarquer que la production de matière verte foliaire reste nettement supérieure à celle des racines même lorsque celles-ci ont achevé leur développement. Il faut attendre le début de la

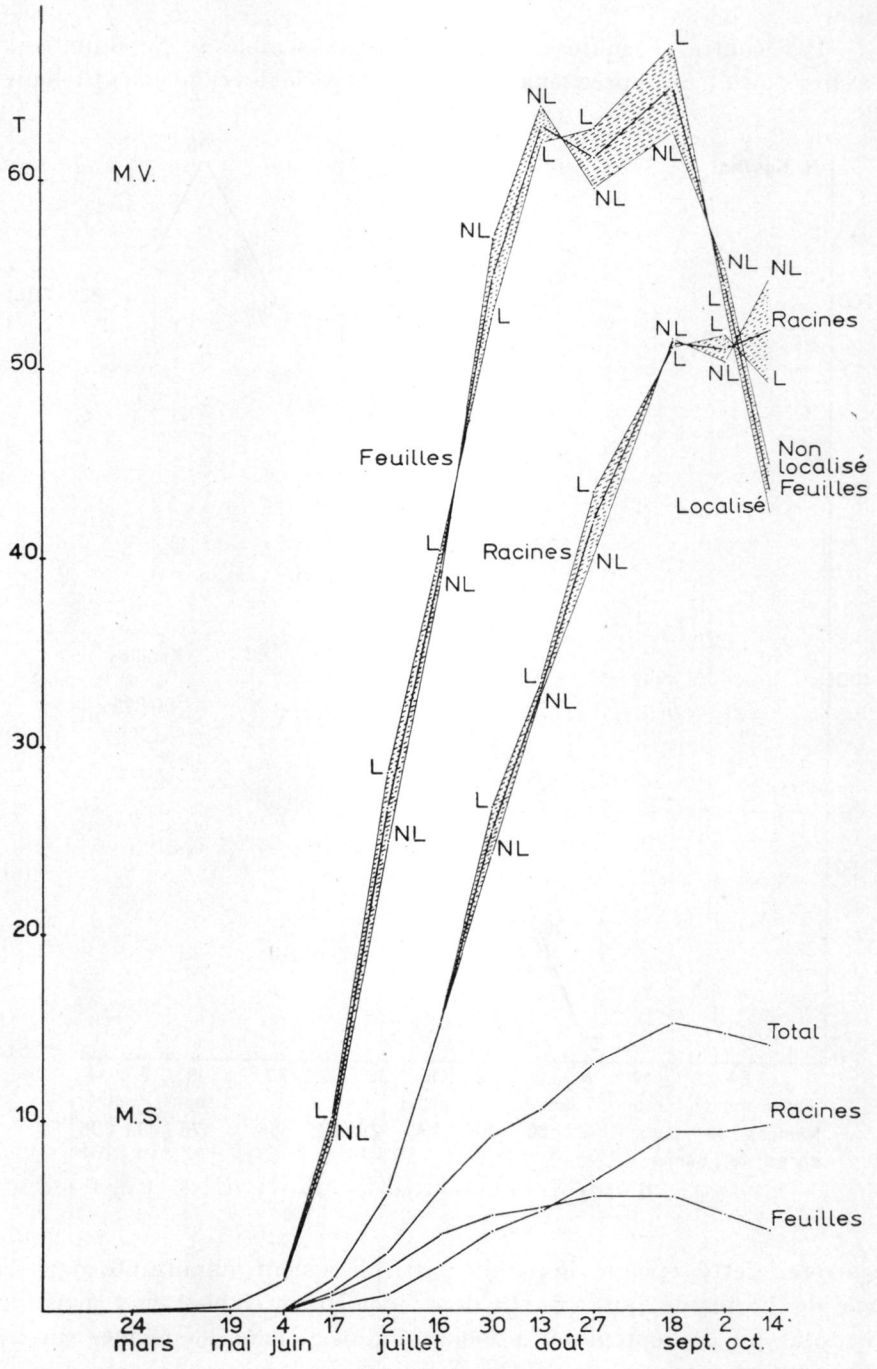


FIG. I. — Matière verte et matière sèche (T/ha) des betteraves en fonction de la date de prélèvement

chute des feuilles pour atteindre, pour les deux parties, un poids identique.

Par contre, l'égalité de matière sèche semble se produire aux environs du 13 août, précisément au moment où le développement foliaire

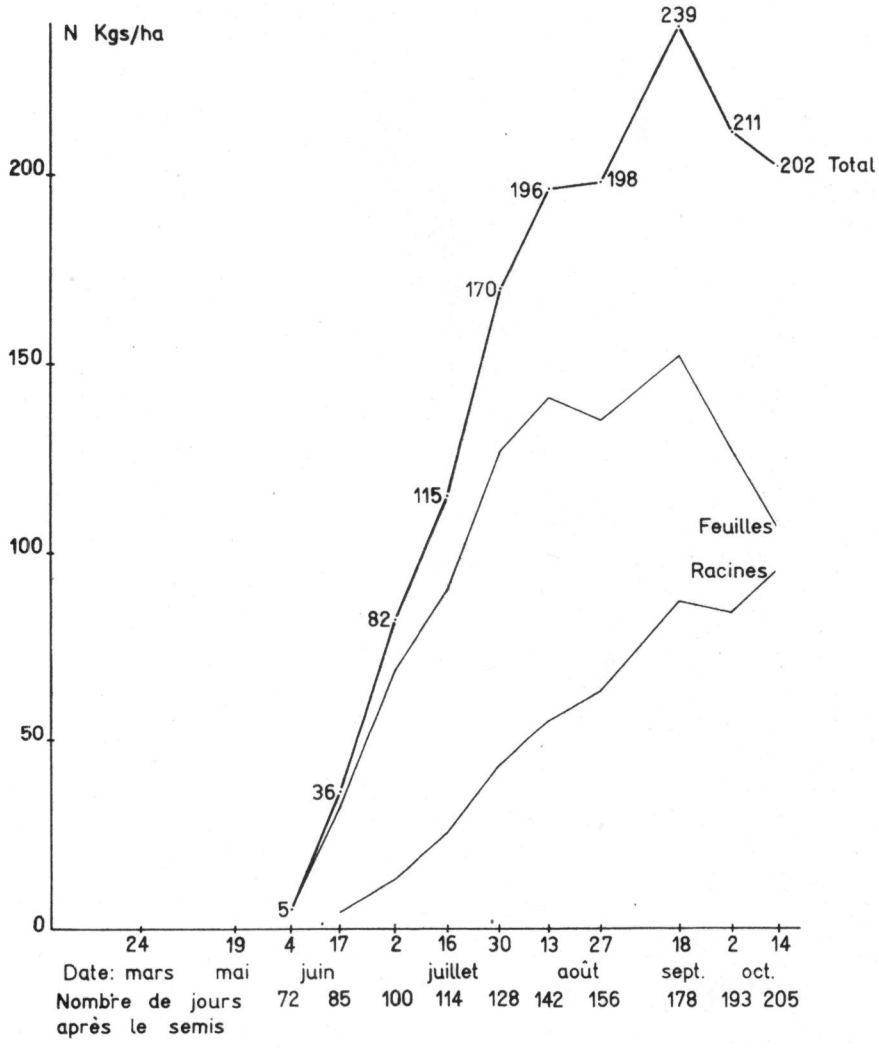


FIG. II. — Quantités d'azote contenues dans la Betterave.

s'arrête. Cette époque apparaît particulièrement importante dans la vie de la plante qui, à partir de ce moment, a élaboré en 1 mois (du 13 août au 18 septembre) 4 200 kg de M. S. dans les racines sur les 9 400 totaux.

Dans une publication antérieure, une période de 70 jours avait déjà

été retenue comme représentant le laps de temps séparant le semis d'une production notable de matière végétale.

Si nous nous reportons aux conditions climatiques nous devons faire remarquer que cette période coïncide avec une nette augmentation de la température moyenne qui passe alors à 16°68.

Le développement foliaire a eu lieu cette année tout au long d'une période au cours de laquelle la température moyenne était supérieure à 16°, tandis que le développement racinaire a coïncidé avec une période de température moyenne supérieure à 17°. Il faut aussi remarquer que la température moyenne, avant le vrai départ de végétation (14 juin — 70e jour), était inférieure à 15° et que l'arrêt de développement des racines (18 septembre — 178e jour) a également coïncidé avec une brusque chute de température passant de 19°24 en moyenne à 15°71.

Or si l'on prend les moyennes mensuelles sur 25 ans on peut affirmer que ces conditions sont, dans notre région, tout à fait normales. En effet les chiffres sont les suivants :

Avril, 10° ; mai, 13°9 ; juin, 17°2 ; juillet, 19° ; août, 18°7 ; septembre, 16°1 ; octobre, 11°1.

Il semble donc que l'on pourrait retenir les deux faits suivants qu'il faudrait vérifier par plusieurs années d'observation :

— Le départ brusque de végétation a lieu 70 jours après le semis.

— Il y aurait avantage à faire coïncider cette période avec une température moyenne supérieure à 16°, soit dans la Picardie, début juin. Ceci amène à préconiser des semis dans la deuxième quinzaine de mars, période qui s'avère effectivement la meilleure dans notre région.

Enfin la somme des températures nécessaires du semis à la maturité oscillerait (4) entre 2 400 et 2 600°.

Or à la fin de la croissance pondérale on totalisait 2 745°.

4. — Marche de l'absorption de l'azote.

a) Variation de teneur en Azote.

Pour les feuilles la teneur va en diminuant depuis le premier prélèvement jusqu'au 27 août. Ensuite cette teneur remonte légèrement indiquant vraisemblablement la chute des feuilles les plus âgées ; la teneur un peu plus élevée notée alors, correspond à une proportion plus importante prise par les jeunes feuilles du cœur du bouquet foliaire.

Pour les racines la diminution est plus régulière.

b) Accumulation dans les racines et les feuilles.

L'accumulation, ou plutôt l'absorption par les deux organes suit le développement de la Matière verte.

Ainsi, pour les feuilles on obtient une production presque maximum

au 13 août avec 141 kg et pour les racines le maximum est atteint au 18 septembre avec 87 kg.

L'exportation maximum a lieu à cette époque avec 239 kg d'azote se répartissant en 152 kg pour les feuilles et 87 kg pour les racines.

Une absorption importante d'azote va du 4 juin au 18 septembre, représentant en moyenne 235 kg en 100 jours, se répartissant de la façon suivante :

Absorption journalière au cours des différentes périodes : kg/ha.

	4 Juin	17 Juin	2 Juillet	16 Juillet	30 Juillet	13 Août	27 Août	18 Sept.
Feuilles	2,08	2,5	1,5	2,65	1,0	—	0,72	
Racines	0,27	0,6	0,85	1,3	0,85	0,57	1,08	
Total	2,35	3,1	2,35	3,95	1,85	—	1,8	

CONCLUSIONS

Cette expérimentation n'a pas mis en évidence la supériorité d'une date particulière d'apport des engrais azotés. Elle a par contre permis de caractériser, pour notre région, la marche du développement végétatif et le rythme de l'absorption de l'azote par la betterave au cours d'une année dont les données climatiques indiquent qu'il s'agissait d'une année moyenne en ce qui concerne les températures mais légèrement plus pluvieuse que la normale.

Ces résultats montreraient l'intérêt de faire coïncider le départ actif de la végétation, noté dans les 70 jours après le semis, avec une période au cours de laquelle la température se relève sensiblement. Par ailleurs, l'arrêt du développement foliaire semblerait se réaliser lorsque la quantité de matière sèche produite par les feuilles serait rattrapée par celle fournie dans les racines, cette quantité ne représentant alors qu'un peu plus de la moitié de la production radiculaire finale.

RÉSUMÉ

L'expérience destinée à mettre en évidence l'influence de la date d'apport des engrais azotés n'a pas montré, cette année, de différences nettes entre les traitements. Cette conclusion négative laisse cependant toute latitude pour choisir l'époque la plus pratique, suivant d'autres considérations, pour réaliser la fumure azotée.

Cet essai a été utilisé également pour suivre, par des prélèvements réalisés tous les quinze jours, la marche du développement de la betterave. Les faits suivants ont été observés ou vérifiés :

— Un démarrage sensible de la végétation ne s'observe que 70 jours après le semis. Ce départ coïncide avec une élévation nette de la température et il y

aurait intérêt à choisir la date de semis de façon telle que 70 jours après, on atteigne une température moyenne supérieure à 16°.

— Le développement foliaire s'est effectué en 70 jours pour s'arrêter lorsque la matière sèche fournie était égale à celle des racines.

— La formation de la matière sèche globale a été achevée après 100 jours de végétation active, l'enrichissement ultérieur de la racine, en sucre, ne s'accompagnant que de faibles variations de poids.

SUMMARY

Experiments on the effect of the time of nitrogen application have not shown any marked differences between treatments this year. This negative result leaves quite a wide scope for choosing the most suitable date for nitrogen application according to other considerations.

The experiments also involved samplings every fortnight with a view to following the development of the sugar beet crop.

A substantial start of vegetation could only be observed 70 days after sowing, coinciding with a marked increase in temperatures ; the date of sowing should, therefore, be chosen preferably so as to have the average temperatures above 16°C 70 days after sowing.

Leaf development progressed during 70 days and stopped when the production of dry matter was equal to that of roots.

The formation of total dry-matter came to an end after 100 days of active growth, and the ultimate enrichment of roots with sugar was accompanied by only slight variations in weight.

ZUSAMMENFASSUNG

Versuch über die Wirkung des Ausstreudatums der Stickstoffdünger auf die Zuckerrübenerträge. Ablauf der Stickstoffaufnahme.

Der Versuch über die Wirkung des Ausstreudatums der Stickstoffdünger hat dieses Jahr keine scharfe Unterschiede zwischen den verschiedenen Behandlungen gezeigt. Diese negative Schlussfolgerung gibt also volle Freiheit zur Auswahl des Stickstoffdüngungszeitpunktes und zwar nach anderen Betrachtungen.

Dieser Versuch wurde auch benutzt um den Ablauf der Entwicklung der Zuckerrübe durch vierzehntätige Probeent : nahmen zu folgen. Folgende Tatsachen wurden festgestellt oder bestätigt :

— ein wirklich wahrnehmbares Wachstum tritt erst 70 Tage nach der Aussaat ein. Dies fällt mit einem deutlichen Steigen der Temperatur zusammen und man hätte Interesse das Aussaatsdatum so zu wählen, dass, 70 Tage danach die mittlere Temperatur 16° übersteigt.

— die Blattentwicklung dauerte 70 Tage und kam zum Stillstand als die Blatttrockenmasse gleich derjenigen der Wurzel nwurde.

— die Bildung der Gesamttrockenmasse war nach 100 Tagen aktiver Entwicklung beendet, die weitere Zuckeranreicherung der Wurzel bewirkt nur geringe Gewichtsänderungen.

Опыт касающийся влияния срока внесения азотных удобрений на культуру сахарной свеклы. Ход поглощения азота.

Ж. ЛЕФЭВР и Ж. ХИРУ. (Амьен.)

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Опыт предпринятый чтобы выяснить влияние срока внесения азотных удобрений не позволил заметить, в этом году, определенных отличий между разными способами. Это отрицательное заключение оставляет, тем не менее, полную свободу, чтобы выбрать срок наиболее удачный, следуя другим соображениям, чтобы осуществить азотное удобрение.

Равным образом, этот опыт был использован, чтоб следить, беря пробы каждые 15 дней, за ходом развития свеклы. Было замечено и проверено следующее :

Значительное (настоящее) начало роста замечается только после 70 дней после посева. Оно совпадает с ясным увеличением температуры, и было бы хорошо выбирать срок посева так, чтобы достичь среднюю температуру выше 16 градусов 70 дней спустя.

Развитие листьев произошло в 70 дней; оно остановилось, когда получившийся сухой вес стал равным весу корней.

Образование общего сухого веса было закончено после 100 дней активного роста; последующее обогащение корней сахаром происходит в условиях почти постоянного веса.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) Publications techniques de l'Institut Belge pour l'Amélioration de la Betterave. Juillet-août-septembre 1956. Résultats définitifs de 8 années d'expériences sur l'étude de l'époque d'application des engrais azotés minéraux pour la betterave sucrière et de son influence sur la végétation.

(2) ADMONT (Ph.). — La fumure de la betterave. *Bulletin des engrais*, 1959, n° 414, p. 3-9.

(3) DEMOLON. — Croissance des végétaux, p. 111 d'après SHANTZ et PIEMERSEL (a Kron, Colorado).

(4) La Betterave sucrière et sa fumure. Institut International de la Potasse. Berne. Année 1954.

Le Directeur-Gérant : B. LACLAVIÈRE.

Imprimerie BUSSIÈRE à Saint-Amand (Cher), France. — 15-12-1959

Dépôt légal: 4e trimestre 1959 *N° d'impression: 368*

631. 416. 872 : 634. 989 84.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA MOBILISATION DU FER DES SOLS SOUS L'INFLUENCE DES LITIÈRES FORESTIÈRES (1)

DEUXIÈME PARTIE

PAR

P. LOSSAINT

Institut de botanique, Strasbourg.

PLAN DU MÉMOIRE

LES FACTEURS RESPONSABLES DE LA SOLUBILISATION DU FER PAR LES LITIÈRES

I. — Rôle quantitatif des substances hydrosolubles des litières.

II. — Rôle qualitatif des substances hydrosolubles.

A. — L'acidité des litières et de leurs extraits.

B. — Le pouvoir réducteur des extraits de litières vis-à-vis du fer.

1° Détermination du pouvoir réducteur des extraits. Principe et mise au point de la méthode.

a) Influence de la durée de contact.

b) Le fer est-il réduit ou complexé ?

c) Influence du pH du milieu.

d) Mode opératoire adopté.

2° Pouvoir réducteur des extraits de litières fraîches.

3° Évolution du pouvoir réducteur des litières au cours de la décomposition.

a) En milieu aérobie.

b) En milieu anaérobie.

C. — Le pouvoir complexant des extraits de litières vis-à-vis du fer. Principe de la méthode. Mode opératoire.

a) Influence du temps de contact.

b) Influence du pH sur le seuil de complexation.

c) Influence de la quantité absolue de fer présente.

d) Stabilité des complexes formés en fonction du temps.

1° Pouvoir complexant des litières fraîches.

a) Cas du fer ferrique.

b) Cas du fer ferreux.

2° Évolution du pouvoir complexant au cours de la décomposition.

a) En milieu aérobie.

b) En milieu anaérobie.

3° Stabilité des complexes extrait-fer.

4° Nature des complexes formés.

1) Cas général.

2) Cas des extraits de litière.

D. — Rôle des polyphénols.

(1) Pour la première partie de ce mémoire, voir *Ann. Agro.* n° 4, 1959.

III. — Essai d'établissement du rôle respectif de ces différents processus dans la solubilisation et le transport du fer.
Discussion.
Conclusions générales.
Bibliographie.

CHAPITRE III

LES FACTEURS RESPONSABLES DE LA SOLUBILISATION DU FER PAR LES LITIÈRES

Le comportement variable des différentes litières lorsqu'on les met en contact avec un sol, soit directement en mélangeant la matière organique avec la terre ou en superposant les deux fractions, soit en percolant ou en agitant la fraction minérale avec les extraits stériles, peut trouver une explication par l'étude des propriétés chimiques des feuilles mortes.

Nous avons vu au premier chapitre que ces dernières se différencient essentiellement par leurs teneurs en substances hydrosolubles, ce qui nous a amené à rechercher en premier lieu une corrélation entre ces valeurs et la quantité de fer libérée.

I. — ROLE QUANTITATIF DES SUBSTANCES HYDROSOLUBLES DES LITIÈRES

De façon générale ce sont les essences les plus riches en substances hydrosolubles qui solubilisent le plus de fer et lorsqu'on met ces deux données en corrélation, on obtient un nuage de points qui ont tendance à se grouper autour d'une branche de parabole (fig. 14).

La courbe exprimant cette relation a tendance à couper l'abscisse pour un certain taux de matières hydrosolubles. Il semble par conséquent qu'une quantité minimum de ces substances soit nécessaire pour que la solubilisation puisse se faire. Notons cependant qu'il s'agit ici des substances hydrosolubles totales, c'est-à-dire minérales et organiques. Il est évident que les premières sont pratiquement inactives, à part peut-être la silice, et que parmi les secondes toutes ne sont pas actives non plus. Dans ces conditions, il est vraisemblable que si on pouvait défalquer ces produits non agissants, la courbe serait décalée vers l'origine de l'abscisse. On voit, par conséquent, *qu'il existe une corrélation positive très remarquable entre le taux de matières hydrosolubles et la quantité de fer solubilisé.* Cependant, si on exprime le taux de fer mobilisé non pas par rapport à

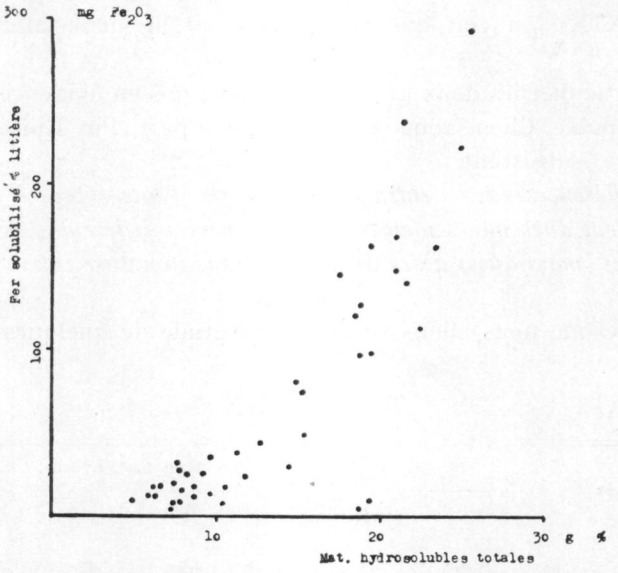


FIG. 14. — Corrélation entre la teneur en substances hydrosolubles totales des litières (g p. 100 litière) et la quantité de fer solubilisé (mg p. 100 g de litière).

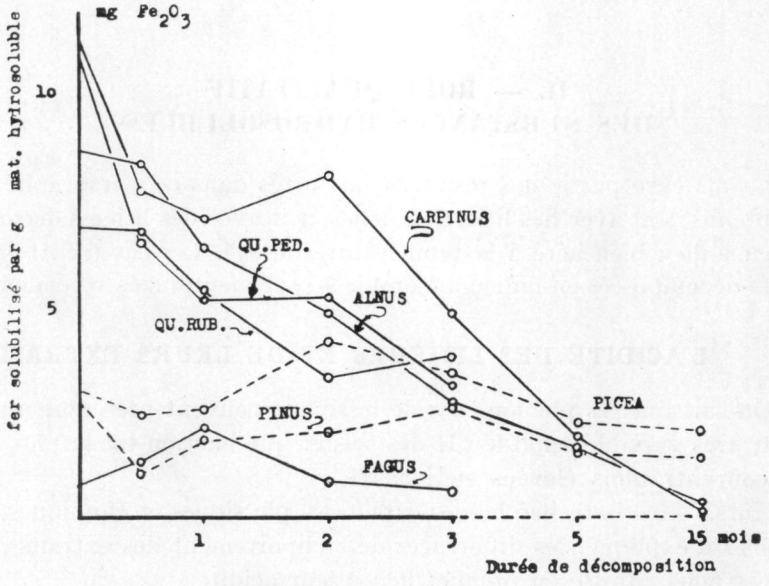


FIG. 15. — Fer solubilisé, en mg par g de matière hydrosoluble, au fur et à mesure de la décompsotion des litières.

100g de litières, comme précédemment (v. fig. 13*), mais par unité de poids de substances hydrosolubles, chiffres qu'on peut obtenir par le calcul (tabl. XIX), on voit que les courbes ont la même allure générale (fig. 15).

En particulier les deux groupes d'espèces mis en évidence : Charme, Chêne pédonculé, Chêne rouge et Aulne d'une part, Pin, Épicéa et Hêtre d'autre part, subsistent.

Les différences dans l'entraînement du fer d'une espèce à l'autre sont par conséquent dues non seulement à des richesses différentes en substances hydrosolubles, mais aussi à des différences dans la nature intrinsèque de ces substances.

C'est ce que nous allons vérifier par l'étude de quelques propriétés des extraits.

TABLEAU XIX

Essences	Fe_2O_3 solubilisé en mg/g mat. hydros. tot.						
	0	1/2	1	2	3	5	15 ms
Aulne	8,8	8,5	6,5	4,9	3,45	1,7	0,32
Charme	11,5	7,8	7,15	8,2	4,9	1,9	0,19
Chêne péd.	11,0	6,55	5,2	5,25	3,15	—	—
Chêne rouge	6,9	6,8	5,3	3,3	3,8	—	—
Hêtre	0,77	1,32	2,12	0,81	0,57	—	—
Épicéa	3,03	2,45	2,55	4,16	3,45	2,24	2,02
Pin	2,75	1,09	1,8	2,0	2,57	1,72	1,4

II. — ROLE QUALITATIF DES SUBSTANCES HYDROSOLUBLES

La majeure partie des résultats rapportés dans ce paragraphe, ont été obtenus, soit avec des litières fraîches, soit avec des litières décomposées en milieu bien aéré à la température de 27°. Les cas d'extraits de litières décomposées en milieu anaérobie seront mentionnés spécialement.

A. — L'ACIDITÉ DES LITIÈRES ET DE LEURS EXTRAITS

On sait que les phénomènes de lessivage peuvent présenter une intensité très variable selon le pH des sols et que l'action est la plus forte aux concentrations élevées en ions H^+.

Aussi, dans la recherche des caractères physiques et chimiques, susceptibles d'expliquer les différences de comportement des extraits, nous sommes-nous adressé en premier lieu à leur acidité.

Nous avons vu dans une expérience de percolation (chap. II, tabl. XVII), que les extraits amenés à pH 7 étaient beaucoup moins actifs

* Voir annales agronomiques N° 4 — (1959) p. 369

que les solutions maintenues au pH initial. Il semble par conséquent que les fonctions acides des corps entrant dans la composition des extraits, jouent un grand rôle.

Pendant la décomposition des litières, leur pH, qui se situe initialement entre 4 et 5,25, s'élève progressivement pour atteindre des valeurs s'échelonnant entre 5,2 et 6,6 après 3 mois. Corrélativement on observe une diminution du pouvoir solubilisant de ces extraits. Cependant en comparant les valeurs de pH observées pour les différentes espèces, à différents stades de décomposition, avec les taux de fer entraînés, aucune corrélation nette ne s'en dégage. Nous nous sommes alors adressé à une

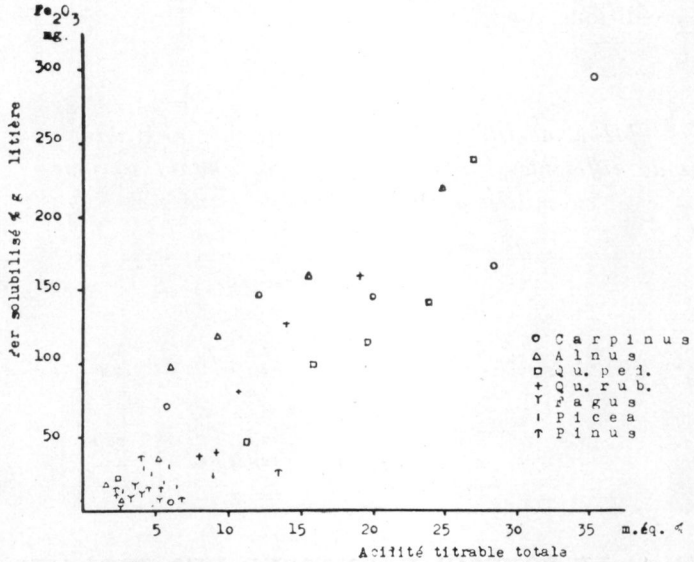


FIG. 16. — Corrélation entre l'acidité titrable totale des extraits et la quantité de fer solubilisé. r = + 0,847.

autre forme de l'acidité : *l'acidité titrable ou acidité potentielle*. Nous avons vu (Chap. I), que les différentes espèces présentaient des valeurs très variables. Les groupes d'essences mis en évidence — feuillus d'une part, Conifères plus Hêtre d'autre part — sont les mêmes que ceux observés pour la solubilisation du fer. Plus cette acidité titrable est élevée, plus l'entraînement du fer est intense. Ainsi, la litière fraîche de Charme, dont les extraits obtenus à froid et à chaud ont une acidité titrable totale de 35,2 méq. pour 100 g de feuilles, arrivent à solubiliser 294,2 mg de Fe_2O_3, alors que dans les mêmes conditions, le Hêtre, avec une acidité de 5,55 méq., ne mobilise que 8 mg de sesquioxyde (voir tabl. XVIII).

Au cours de la décomposition, les taux de fer solubilisés diminuent en même temps que l'acidité titrable des extraits. La figure 16, dans laquelle on a utilisé les valeurs concernant les litières fraîches et les litières

décomposées, montre qu'il existe une corrélation positive entre les deux facteurs. Le coefficient de corrélation est de + 0,847.

$r = 0{,}30$ pour le seuil de probabilité $P(x) = 0{,}05$ et 0,43 pour $P(x) = 0{,}01$. La probabilité pour que r soit significatif est par conséquent bien supérieure à 99 p. 100.

Lorsqu'on fait décomposer les litières *en milieu privé d'air* en les submergeant avec de l'eau dans des flacons soigneusement bouchés, on constate que les extraits obtenus sont nettement plus acides que ceux obtenus à partir de litières décomposées en milieu aéré, comme le montre le tableau XX. L'acidification du milieu, lors des fermentations anaérobies, constitue une des explications de la meilleure mobilisation du fer dans ces conditions.

TABLEAU XX

pH et acidité titrable (en méq. p. 100 litière) *de différentes litières décomposées pendant* 16 *jours en milieu aéré et en milieu privé d'air.*

	Charme	Chêne péd.	Pin	Épicéa
pH				
aérobie	5,6	5,8	6,6	6,1
anaérobie	5,15	5,1	5,25	5,4
Acidité titrable				
aérobie	8,75	7,0	0,62	1,75
anaérobie	16,25	12,1	4,9	3,75

B. — LE POUVOIR RÉDUCTEUR DES EXTRAITS DE LITIÈRE VIS-A-VIS DU FER

Plusieurs auteurs ont mis l'accent, ces dernières années, sur le rôle favorable de la réduction du fer ferrique à l'état ferreux, sur sa mobilisation dans les sols. Ainsi, pour ne citer que les travaux les plus récents, BETREMIEUX (1951) a montré que les processus de réduction liés à l'activité microbienne sont d'une grande importance dans l'évolution des éléments susceptibles de prendre des formes réduites plus solubles que les formes oxydées correspondantes. Tel est le cas du fer et du manganèse.

L'étude expérimentale de ces réactions, telle qu'elle a été envisagée par BETREMIEUX, met en évidence le rôle essentiel des phénomènes d'oxydo-réduction, qui, on le sait, sont intimement liés à l'activité microbienne dans les sols.

Parmi les microorganismes réducteurs des formes ferriques qui interviendraient, l'auteur cite *Bacillus circulans*, *B. polymyxa*, *Escherischia*.

IARKOV (1954, 1956) insiste également sur les phénomènes de réduction au cours de la podzolisation et, dans ses conclusions, admet que la réduction du fer dans les sols est due essentiellement aux conditions d'anaérobiose qui règnent saisonnièrement dans le sol. Ainsi trouve-t-il une teneur maximum en FeO au printemps, tant sous forêt que sous des prairies ou dans des sols cultivés. La correspondance est très nette entre le degré d'humidité des sols pendant les différentes saisons et leur teneur en fer ferreux. Il constate cependant que la réduction est toujours liée à la présence de matière organique. L'auteur n'observe pas la formation de fer ferreux en l'absence d'humus. Il conclut que la création de conditions momentanées d'anaérobiose au cours de la décomposition de la matière organique et, de ce fait, la formation d'acides organiques d'un type déterminé, est la condition essentielle de la podzolisation. Nous pensons, à la lumière de nos propres expériences, que l'auteur n'a pas entièrement raison. En effet, si sans aucun doute les phénomènes d'anaérobiose favorisent largement la réduction et par conséquent la mobilité du fer, elles ne constituent pas une condition absolument nécessaire.

En effet, toutes les matières organiques sont tant soit peu réductrices vis-à-vis du fer ferrique, même en milieu aéré. Nos résultats et ceux de BLOOMFIELD (1952-1955), obtenus par des méthodes et avec des matériaux variés, le prouvent amplement. Il suffit que l'humidité du sol soit assez grande pour mettre les substances réductrices en solution et leur permettre de réagir avec le substrat minéral, ce qui, sous nos climats, est réalisé pendant une partie de l'année.

Cependant, à part les résultats récents qu'ont obtenus BETREMIEUX (1951) avec de la luzerne hachée, BLOOMFIELD et DELONG avec des litières d'essences néo-zélandaises et américaines, on ne possède pas de données sur le pouvoir réducteur des différents types de matières organiques susceptibles d'intervenir dans la pédogenèse. Il était par conséquent intéressant d'étudier quantitativement ce facteur chez nos essences médio-européennes. Nous avons abordé le problème sous deux de ses principaux aspects :

1° En déterminant comparativement le pouvoir réducteur de différentes litières ;

2° En étudiant l'évolution de cette propriété au cours de la décomposition.

1. — Détermination du pouvoir réducteur des extraits de litières.

Nous avons essayé plusieurs méthodes pour déterminer le pouvoir réducteur des extraits de litières.

Ainsi, des dosages à chaud au permanganate donnent effectivement des résultats qui présentent un certain intérêt. La méthode est analogue

à celle qu'on utilise couramment pour le dosage des acides humiques. Cependant, $KMnO_4$ est un oxydant trop puissant, qui détruit pratiquement de façon complète la matière organique.

Pour la même raison, le dosage du fer ferreux en présence de matière organique n'est pas réalisable par la méthode classique au bichromate de Potassium. En effet, la consommation de bichromate par la matière organique est de loin supérieure à celle due au fer ferreux, et même en opérant par différence, on ne peut espérer obtenir des résultats valables.

Des mesures de potentiel d'oxydo-réduction des extraits ont également été tentés. Ainsi, les potentiels, mesurés à l'aide d'une électrode en platine, en atmosphère d'azote purifié au préalable par barbotage dans une solution alcaline de pyrogallol et exprimés en rH_2, sont les suivants :

	rH_2
Charme	19,95
Aulne	19,6
Pin	22,4
Epicéa	22,4

Les mesures ont été effectuées sur l'extrait à froid de 5 g de litière dans 100 cm³ d'eau distillée et les valeurs de rH calculées à partir des potentiels mesurés, grâce à la formule :

$$rH^2 = \frac{E}{29} + 2\,pH.$$

L'échelle des rH_2 s'étend de 0 à 41 (FLAIG, 1955), $rH = 27{,}3$ étant le point de neutralité. Les valeurs obtenues montrent que les extraits de litière sont tous réducteurs. On observe en plus une différence selon les espèces : les deux feuillus sont nettement plus réducteurs que les deux résineux. Ce résultat a pu être confirmé par plusieurs séries de mesures effectuées dans des conditions semblables.

La méthode des papiers indicateurs de rH_2 n'était pas applicable dans le cas présent. En effet, les colorants sont trop facilement adsorbés par les matières organiques des extraits.

Toutes ces méthodes, malgré qu'elles permettent de conclure à des propriétés réductrices de nos extraits, ne pouvaient pas nous renseigner sur la quantité de fer capable d'être effectivement réduite par ces derniers.

Aussi avons-nous, par la suite, mis au point une méthode colorimétrique *quantitative* d'étude de la réduction du fer lui-même.

Principe et mise au point de la méthode.

On sait que le fer ferrique donne avec le sulfocyanure de potassium une coloration rouge due à la formation d'un complexe dont la formule est la suivante :

$$Fe[Fe(CNS)6].$$

Cette propriété est utilisée depuis fort longtemps pour le dosage du fer ferrique par colorimétrie.

Or, on constate qu'en présence d'extraits de litière la coloration rouge obtenue est sensiblement atténuée, et ceci d'autant plus que la quantité d'extrait en présence est plus grande. Par conséquent une partie du fer ne réagit plus, soit parce qu'il est masqué à la suite de la formation d'un complexe avec la matière organique, soit parce qu'il est réduit à l'état de fer ferreux (Fe^{++} ne réagit pas avec le sulfocyanure).

a) INFLUENCE DE LA DURÉE DE CONTACT DE L'EXTRAIT AVEC LE FER.

Après mise en contact de l'extrait avec le fer ferrique, la réduction n'est pas immédiate. L'expérience suivante, illustrée par la figure 17,

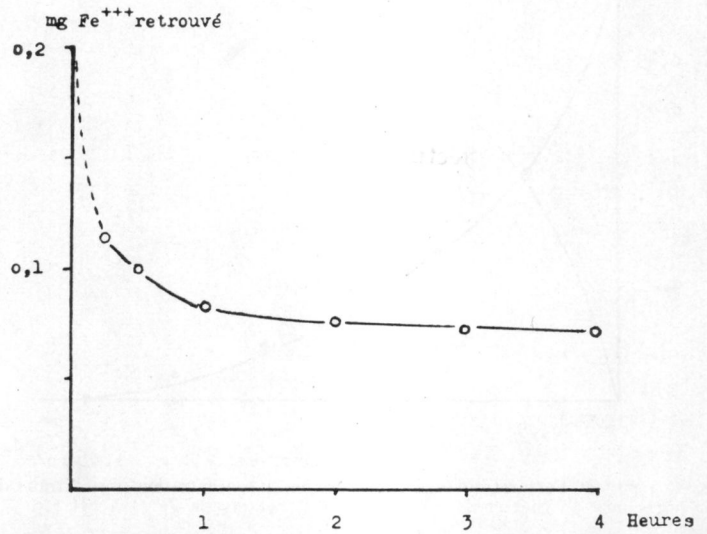


FIG. 17. — Quantité de Fe^{+++} retrouvée, après mise en présence de 0,2 mg de Fe^{+++} avec un extrait de litière d'Aulne, à pH 2,5, en fonction de la durée de contact.

montre qu'il faut attendre au moins 4 h pour obtenir la réduction maximum à la température du laboratoire. Le mode opératoire était le suivant :

0,2 mg de fer ferrique, sous forme de sulfate ammoniacal, sont mis en présence de 20 cc d'extrait d'Aulne à 1,8 g de feuilles par litre. Après des temps variables on ajoute 5 cc de sulfocyanure de potassium à 20 p. 100 et on effectue la colorimétrie immédiatement. La réduction maximum n'est atteinte qu'après 4 h. Pour plus de sécurité, les mesures ultérieures ont été effectuées après un temps de contact de 24 heures.

b) LE FER EST-IL RÉDUIT OU COMPLEXÉ ?

L'expérience suivante permettra de résoudre cette question. On a préparé une série d'extraits de Pin de concentration croissante allant de 0,05 à 0,30 g de litière par 20 cc de solution. Après addition de 0,2mg de

fer ferrique à chaque échantillon et un temps de contact de 24 heures, on effectue la colorimétrie, d'une part en présence de sulfocynanure, d'autre part en présence d'*o*-phénanthroline (réactif du fer ferreux). La figure 18 montre l'allure des courbes ainsi obtenues.

Au fur et à mesure que la concentration de l'extrait croît, la quantité de Fe^{+++} trouvée au sulfocyanure décroît pour devenir nulle pour une concentration de l'extrait de 0,30 g/20 cm³. Simultanément la teneur en Fe^{++} augmente de la même façon pour atteindre la valeur de 0,2 mg pour la même concentration de l'extrait que précédemment.

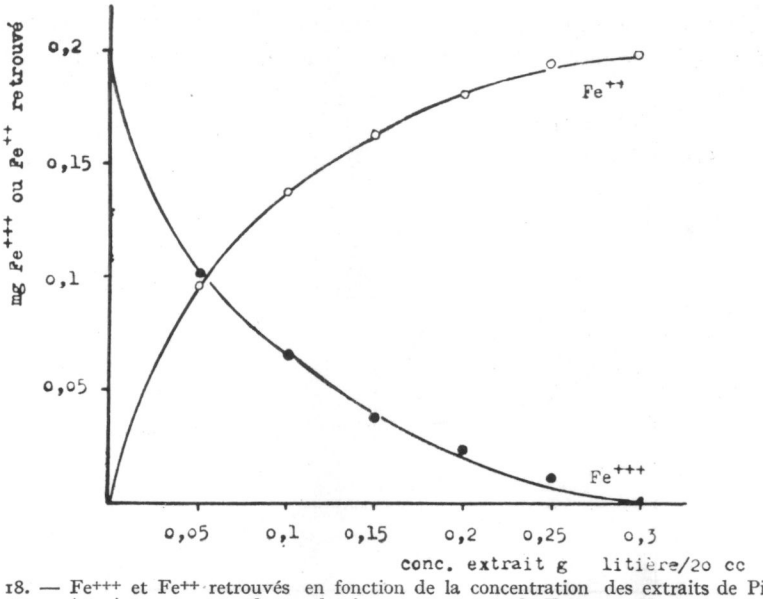


FIG. 18. — Fe^{+++} et Fe^{++} retrouvés en fonction de la concentration des extraits de Pin, après mise en contact de ces derniers avec 0,2 mg de Fe^{+++} à pH 2,5.

La somme de Fe^{++} et Fe^{+++} obtenue pour chaque concentration est égale, avec une marge d'erreur de $\pm$ 3 p. 100 due aux mesures, à la quantité de fer ajoutée initialement (tabl. XXI).

TABLEAU XXI

Réaction du Fe^{+++} au sulfocyanure et du Fe^{++} à l'o-phénanthroline après mise en contact de 0,2 mg de Fe^{+++} avec des extraits de concentration croissante d'aiguilles de Pin, à pH 2,5.

Concentration extraits g	mg Fe^{+++} retrouvé	mg Fe^{++} retrouvé	Fer total retrouvé
0,05	0,096	0,1	0,196
0,1	0,066	0,138	0,204
0,15	0,038	0,164	0,202
0,20	0,024	0,182	0,206
0,25	0,012	0,196	0,208
0,30	0	0,2	0,200

Ce fait, ainsi que la parfaite symétrie des deux courbes, indique que le fer réagit en totalité avec les réactifs, donc qu'il n'est pas complexé vis-à-vis de ces derniers par la matière organique.

Une autre expérience vient confirmer cette affirmation. Si on met du fer ferreux (solution de sel de Mohr) en présence des extraits, toutes autres conditions étant identiques aux précédentes, on retrouve la totalité de ce fer par colorimétrie.

On peut par conséquent affirmer que si une partie du fer ne réagit plus au sulfocyanure, ce n'est certainement pas parce qu'il est complexé par la matière organique, mais qu'il est réduit par cette dernière. Cette conclusion est valable pour les conditions dans lesquelles nous avons travaillé, c'est-à-dire pour un pH de 2,5 des solutions.

Observation :

Si la colorimétrie du complexe sulfocyanique en présence de matière organique ne présente pas de difficulté, il n'en est pas de même avec le complexe rouge de l'*o*-phénanthroline. En effet au fur et à mesure de la séquestration du Fe^{++} par ce réactif, l'équilibre du système Fe^{+++}- Fe^{++} se trouve rompu. D'après SCHNITZER et DELONG (1954), la baisse d'activité de l'ion Fe^{++} provoque une augmentation du potentiel d'oxydo-réduction du couple, qui favorise l'oxydation de la matière organique avec réduction concomitante de Fe^{+++}. On a donc intérêt à effectuer les mesures colorimétriques assez rapidement après addition du réactif pour éviter de trouver un excès de fer ferreux. L'expérience a montré que dans les essais ci-dessus, les mesures devaient être faites après 8-10 minutes.

c) INFLUENCE DU pH DU MILIEU :

Les mesures précédentes ont toutes été effectuées à un pH bas se situant entre 2 et 2,5 pour la raison suivante :
le complexe sulfocyané n'est stable qu'en milieu nettement acide. Celui de l'*o*-phénanthroline par contre supporte des pH entre 2 et 9, sans que la coloration rouge soit altérée.

Dans le but d'étudier l'influence du pH sur le pouvoir réducteur des extraits, nous avons effectué une série de mesures avec les deux indicateurs en ayant eu soin d'ajouter à la liqueur sulfocyanée de l'acide chlorhydrique juste avant la mesure colorimétrique.

Méthode :

On dispose, dans une série de fioles jaugées de 50 cc, 2 cc d'extrait de feuilles de Chêne correspondant à 20 mg de litière (extrait à 1 p. 100). Puis on ajoute dans l'ordre : une quantité croissante de mélange tampon d'acétate de soude M/5 et de NaOH N/10 et 0,25 mg de Fe^{+++} sous forme

de sulfate ammoniacal acidifié. On complète à 50 cc avec de l'eau distillée et on effectue après 24 h la colorimétrie sur une aliquote de 20 cc :

1° A l'*o*-phénanthroline après 10 mn de contact ;

2° Au sulfocyanure de K après addition de 1 cc de HCl 1/2 pour revenir à un pH franchement acide.

Les résultats du tableau XXII et de la figure 19 montrent que les quantités de Fe^{++} trouvées à l'*o*-phénanthroline sont à peu de chose près constantes jusqu'à pH 3,5, après quoi elles subissent une forte diminution

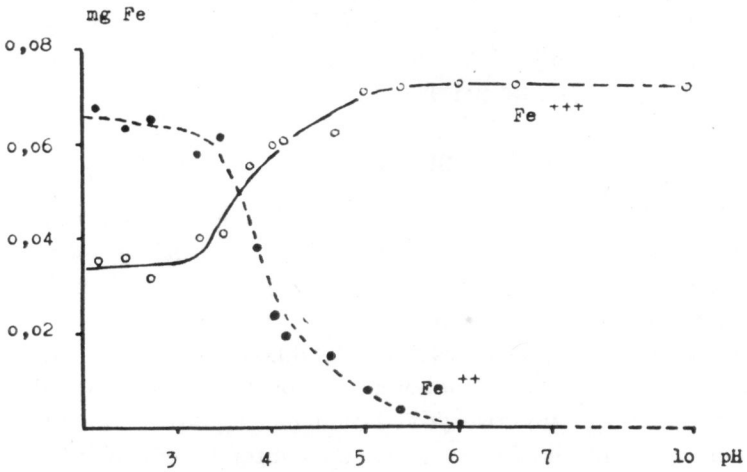


FIG. 19. — Influence du pH sur la quantité de Fe^{+++} et de Fe^{++} retrouvée. Extrait de Chêne pédonculé à 1 p. 100, mis en présence de 0,1 mg de Fe^{+++}.

pour devenir nulles à pH 6. Corrélativement, la courbe de Fe^{+++}, après un semblant de palier jusqu'à pH 3,5, remonte mais n'atteint pas la valeur théorique de 0,1 mg à pH 6 comme on pouvait le prévoir (voir tabl. XXII).

TABLEAU XXII

Réduction de 0,1 mg de Fe^{+++} par un extrait de feuilles de Chêne à 1 p. 100 en fonction du pH.

pH	Fe^{++} retrouvé	Fe^{+++} retrouvé	Fer total retrouvé
2,1	0,068	0,036	0,104
2,4	0,064	0,036	0,1
2,7	0,065	0,032	0,097
3,2	0,058	0,040	0,098
3,5	0,062	0,041	0,103
3,8	0,038	0,056	0,094
4,0	0,024	0,060	0,084
4,1	0,020	0,060	0,08
4,6	0,016	0,062	0,078
5	0,008	0,072	0,08
5,4	0,004	0,072	0,076
6,0	0	0,072	0,072
6,6	0	0,072	0,072
9,9	0	0,072	0,072

Cette anomalie peut s'expliquer de deux façons :

1° Soit qu'à la suite de l'addition de HCl dans le dosage au sulfocyanure une partie du fer ferrique se trouve rapidement réduite dans l'intervalle de temps qui sépare l'addition du réactif et la mesure.

2° Soit que pour ces valeurs de pH la matière organique contracte des liaisons complexes avec Fe^{+++} et Fe^{++}.

Cette deuxième hypothèse a pu être vérifiée dans le cas du Fer ferreux. L'étude de la réactivité de Fe^{++} avec l'*o*-phénanthroline en présence de matière organique montre qu'il réagit totalement entre pH 2,5 et 5. A

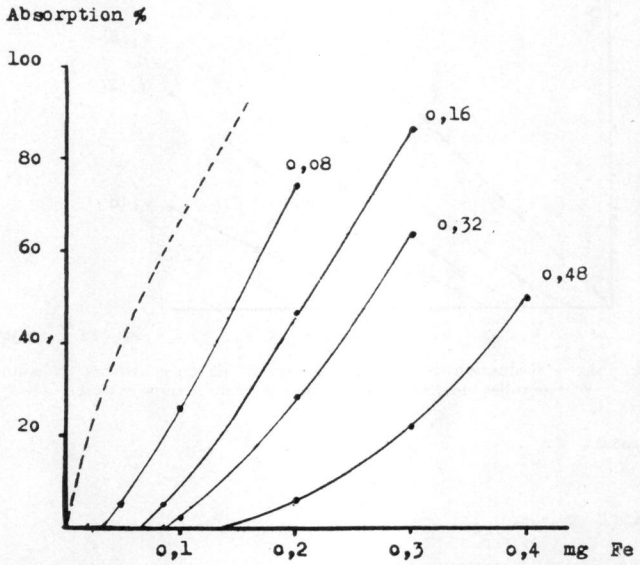


FIG. 20. — Absorption de la lumière par le complexe sulfocyanique du fer en présence d'extraits de concentration croissante d'aiguilles de Pin. En pointillé, la courbe d'absorption témoin, sans extrait. Les concentrations des extraits sont exprimées en g/20 cc et figurent en regard des courbes.

partir de cette valeur, le fer retrouvé après 24 h de contact avec un extrait et 10 mn avec l'*o*-phénanthroline, diminue très rapidement et d'autant plus, que la quantité de matière organique en présence est plus grande. Des tests au sulfocyanure montrent qu'il n'est pas réoxydé. Il faut par conséquent admettre qu'il est partiellement masqué par la matière organique aux pH supérieurs à 5.

Quoi qu'il en soit, nous avons ici encore une fois la preuve qu'à pH bas, la totalité du Fer (Fe^{++} et Fe^{+++}) réagit avec les deux réactifs.

Mais le fait le plus intéressant à signaler est la forte diminution du pouvoir réducteur des extraits en fonction du pH. Notons cependant qu'entre pH 4 et 6, qui sont des valeurs les plus fréquemment observées dans les litières des sols forestiers podzoliques, ce dernier reste appréciable.

d) Mode opératoire adopté.

Les extraits ont été préparés de la même façon que précédemment, c'est-à-dire en faisant macérer les litières dans de l'eau distillée pendant

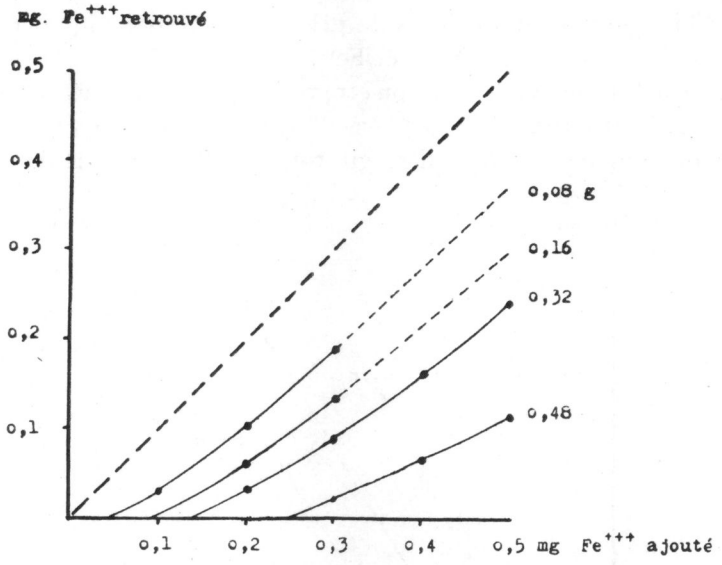


Fig. 21. — Réduction du fer par des extraits de concentration croissante d'aiguilles de Pin. En pointillé, le témoin sans extrait.

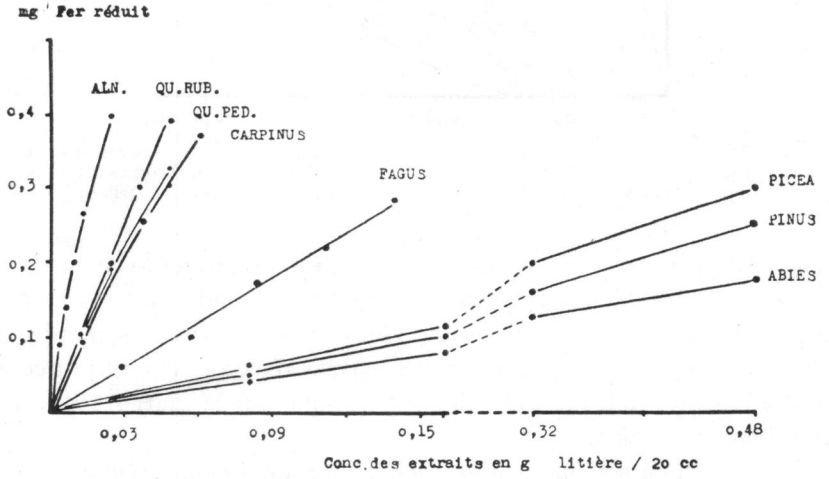


Fig. 22. — Quantités de fer réduites, en fonction de la concentration des extraits à froid de différentes litières.

24 heures, à la température du laboratoire, en présence d'une trace d'azothydrate de soude pour empêcher les fermentations. Les concentrations sont exprimées en g de litière par quantité d'eau. Des doses croissantes de Fer ferrique (solution de sulfate ferrique ammoniacal + 5 cc d'acide sulfuri-

que concentré par litre de solution) sont mises en présence d'extraits d'une certaine concentration dans une série de fioles jaugées. Le pH était fixé uniformément à 2,5 dans toutes les solutions pour les raisons évoquées ci-dessus. Après 24 heures de contact on effectue la colorimétrie au sulfocyanure et on trace les courbes d'absorption de la lumière pour les différentes concentrations. La figure 20 montre l'abaque ainsi obtenu avec les extraits à froid de litière de Pin. Comme ces derniers ont une coloration propre (jaune paille très clair à brun clair), le zéro du colorimètre (100 p. 100 de transmission) a été réglé avec des extraits témoins auxquels on a ajouté préalablement un volume d'eau correspondant à la quantité de réactif.

On voit que les courbes s'éloignent d'autant plus de la courbe témoin que les extraits sont plus concentrés. A partir de cet abaque on peut calculer les courbes représentant les quantités de Fer retrouvées par rapport au fer ajouté en fonction des différentes concentrations utilisées (fig. 21). Les courbes de concentration coupent l'axe des abscisses en des points qui représentent la réduction totale de Fe^{+++} ajouté. Il suffit de porter ces valeurs sur un nouveau graphique en fonction de la concentration des extraits pour connaître le pouvoir réducteur vis-à-vis du Fer de ces derniers (voir fig. 22).

2. — Pouvoir réducteur des litières fraîches.

La méthode décrite ci-dessus a été utilisée pour déterminer le pouvoir réducteur de huit litières fraîches, non encore décomposées.

Comme le montre le tableau XXIII, ces dernières présentent un pouvoir réducteur croissant avec la concentration des extraits. Cependant on remarque, d'après la figure 22, qu'il n'y a pas de relation linéaire entre ces deux variables pour toutes les espèces étudiées. Ainsi chez les quatre feuillus, Aulne, Chêne pédonculé, Chêne rouge et Charme, le pouvoir réducteur n'augmente pas de façon exactement proportionnelle à la concentration des extraits, mais présente des valeurs relativement plus basses aux fortes concentrations. Ceci semble indiquer, du moins pour ces espèces, que les solutions sont relativement plus actives à faible concentration.

Notons la grande différence entre le pouvoir réducteur des différentes espèces. Trois groupes peuvent être distingués :

1° La majorité des feuillus : Aulne, Chêne pédonculé, Chêne rouge et Charme, avec un pouvoir réducteur élevé, particulièrement chez la première essence ;

2° Le Hêtre ;

3° Les résineux : Pin, Épicéa et Sapin, avec un pouvoir réducteur faible.

Tableau XXIII

Réduction du fer, à pH 2,5, en fonction de la concentration des extraits. La concentration est exprimée en mg de litière pour 20 cc.

Essences	Concentration des extraits	Fer réduit mg
Aulne	3	0,09
	6	0,14
	9	0,2
	12	0,265
	24	0,4
Charme	12	0,105
	24	0,2
	36	0,25
	48	0,3
	60	0,375
Chêne pédonculé	12	0,1
	24	0,2
	36	0,285
	48	0,32
Chêne rouge	12	0,095
	24	0,2
	36	0,3
	48	0,395
Hêtre	28	0,06
	56	0,1
	84	0,175
	112	0,22
	140	0,285
Épicéa	80	0,065
	160	0,115
	320	0,2
Pin	80	0,04
	160	0,1
	320	0,16
Sapin	80	0,05
	160	0,08
	320	0,13

Tableau XXIV

Pouvoir réducteur, à pH 2,5, de différentes litières non décomposées.
(I) Quantité minimum de litière en g, permettant la réduction totale de 1 g de fer.
(II) Quantité minimum de matières hydrosolubles, en g, permettant la réduction totale de 1 g de fer.

	Aulne	Charme	Chêne péd.	Chêne rouge	Hêtre	Épicéa	Pin	Sapin
g fer réduit par 100 g de litière	2,77	0,92	0,83	0,77	0,18	0,069	0,057	0,046
Seuil de réduction totale (I) ...	36	109	120	130	560	1 450	1 761	2 160
g fer réduit par g mat. hydrosol.	0,142	0,079	0,076	0,065	0,030	0,0145	0,0143	0,0123
Seuil de réduction totale (II) ..	7	13	13	15,3	33	69	70	81

Pour exprimer quantitativement cette propriété des litières, nous avons choisi arbitrairement le niveau 0,1 mg de fer réduit (1) (voir fig. 22) et adopté deux modes d'expression (tabl. XXIV) :

1° Quantité de fer réduite par les extraits de 100 g de litière ;

2° Quantité de litière minimum, en g, pour assurer la réduction totale d'un gramme de fer.

On voit que dans les conditions expérimentales utilisées (mesures à pH 2,5), des quantités considérables de fer peuvent être réduites.

Le comportement variable des extraits de différentes essences peut être imputé à leur teneur différente en substances hydrosolubles. Cependant on voit, d'après le tableau XXIV que, si on exprime les résultats, non plus par rapport à 100 g de litière, mais par rapport à 1 g de substances hydrosolubles, ces différences subsistent. A concentration identique, les matières hydrosolubles des feuillus ont des propriétés réductrices plus grandes que celles des résineux.

Deux propriétés des litières permettent par conséquent d'expliquer ces différences dans le pouvoir réducteur :

1° *Les teneurs variables en substances solubles libérables*, les essences les plus riches présentant le pouvoir réducteur le plus élevé.

2° *Les propriétés réductrices variables* des composés chimiques entrant dans la composition des extraits. Ceux des feuillus sont plus actifs que ceux des résineux.

3. — Évolution du pouvoir réducteur des litières en cours de décomposition.

a) En milieu aérobie :

En étudiant cette propriété sur des extraits de quatre litières soumises à la décomposition aérobie au laboratoire, on s'aperçoit qu'elle diminue très fortement pendant le premier mois chez l'Aulne et le Charme (tableau XXV et fig. 23). Après 4 semaines les valeurs ont été réduites respectivement au quart et au cinquième de la valeur initiale. Chez l'Épicéa et le Pin, par contre, la diminution est beaucoup plus faible. Au bout de trois mois on observe une nouvelle baisse chez l'ensemble de quatre espèces, alors qu'après 5 mois une légère remontée du pouvoir réducteur se manifeste.

Dans l'ensemble, on peut conclure que l'abaissement des valeurs du pouvoir réducteur est brutal pendant les trois premiers mois de décomposition chez les deux feuillus, et lente, presque insignifiante, chez les deux Conifères. Il ne semble pas qu'il faille accorder une grande importance à la légère remontée observée au bout du cinquième mois.

(1) 0,1 mg/20 cc : 5 ppm.
Cette concentration en fer est de loin inférieure aux concentrations maxima observées dans les liquides de percolation des lysimètres (voir DEB, 1949).

Tableau XXV

Réduction du fer par les extraits obtenus à partir de litières décomposées au laboratoire pendant des durées variables : extraits à froid.

Espèces	Durée de décomposition	Perte de poids % mat. init.	Teneur des litières en mat. hydrosoluble	g de fer réduit par 100 g de litière	g de fer réduit par g de mat. hydrosoluble
Aulne	0	0	19,5	2,77	0,142
	1 mois	26,8	9,15	0,66	0,072
	3	33,7	3,61	0,213	0,059
	5	49,4	4,37	0,277	0,064
Charme	0	0	11,6	0,92	0,079
	1	17,8	9,75	0,166	0,017
	3	31,8	8,6	0,043	0,005
	5	48	5,5	0,077	0,014
Épicéa	0	0	4,75	0,069	0,0145
	1	7,75	1,5	0,045	0,03
	3	14,15	1,77	0,023	0,013
	5	25	2,66	0,065	0,0315
Pin	0	0	4,0	0,057	0,014
	1	2,7	3,05	0,025	0,008
	3	16,05	2,5	0,021	0,008
	5	37,6	1,85	0,033	0,018

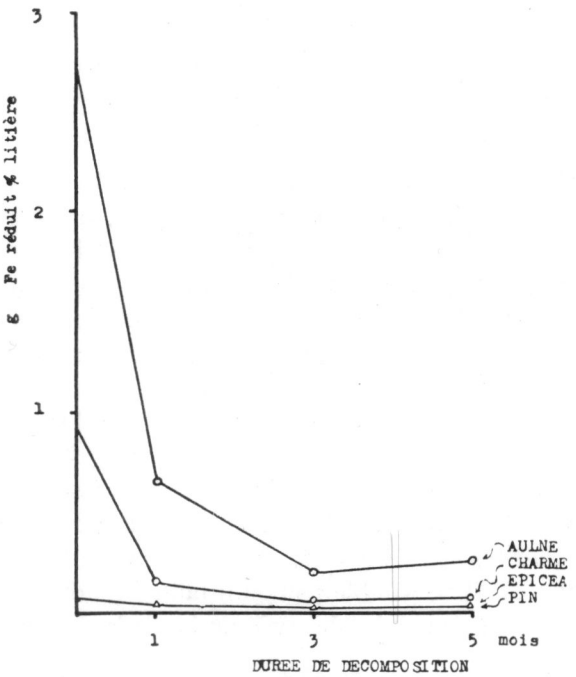


FIG. 23. — Évolution du pouvoir réducteur des extraits à froid de différentes litières au cours la décomposition. Résultats exprimés en g Fe réduit/100 g litière.

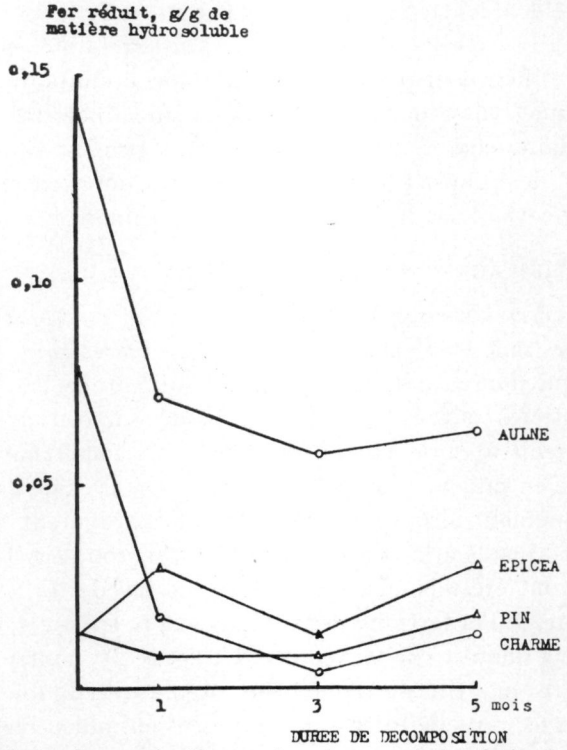


FIG. 24. — Évolution du pouvoir réducteur des substances hydrosolubles de différentes litières au cours de la décomposition. Résultats exprimés par g de mat. hydrosoluble.

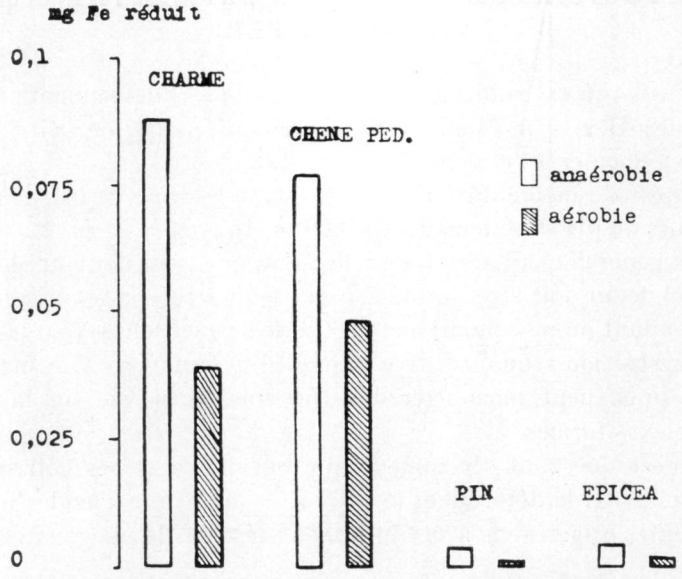


FIG. 25. — Quantités de fer réduites par les extraits à 2 p. 100 de différentes litières décomposés pendant un mois en milieu aérobie et en milieu anaérobie. Fe^{+++} mis en présence : 0,1 mg pour 20 cc d'extrait. Mesures effectuées à pH 2,5, après 24 h.

Le parallélisme entre le pouvoir réducteur et la teneur en matières hydrosolubles des extraits observé avec les litières fraîches se confirme à nouveau ici et l'on peut penser que la diminution du pouvoir réducteur correspond à une baisse dans les teneurs en substances solubles des extraits. Cependant, comme précédemment, la figure 24 montre que ces substances ont des propriétés réductrices d'importance très inégale d'une espèce à l'autre et qui ont tendance à persister pendant la décomposition.

b) En milieu anaérobie :

Les substances hydrosolubles produites lors de la décomposition anaérobie des litières sont plus réductrices que celles formées en milieu aéré.

C'est ce que nous a montré l'expérience suivante :

Quatre litières ont été soumises à la décomposition pendant un mois : une première série en milieu aéré de la façon habituelle ; une deuxième série en milieu complètement submergé avec de l'eau et en flacons hermétiquement fermés. 20 cc d'extraits des différents échantillons, préalablement ajustés à la concentration de 2 p. 100 (2 g de litière pour 100 cc d'eau) ont été mis en contact avec 0,1 mg de fer. On détermine au sulfocyanure, le Fer ferrique restant après 24 h, à pH 2,5, et on obtient par différence la quantité de fer réduite. La figure 25 montre qu'en milieu anaérobie, cette quantité de fer réduite est presque double de celle observée avec les extraits de litières décomposées en milieu bien aéré.

C. — LE POUVOIR COMPLEXANT DES EXTRAITS DE LITIÈRES VIS-A-VIS DU FER

On sait qu'en solution les ions ferriques deviennent instables à partir de pH 2,5, qu'ils s'hydrolysent et qu'à partir de pH 3,5 ils ont tendance à floculer à l'état de $Fe(OH)_3$ (Bezier, 1945).

Il en est de même du fer ferreux, dont l'hydroxyde est peu soluble aux valeurs de pH supérieures à 6 (Bezier, 1945).

Il est généralement admis actuellement, que pour pouvoir se déplacer dans le sol, le fer doit être « protégé » ou « séquestré » ou *complexé* [1].

Cependant on ne connaît encore que très peu de choses sur la capacité de « séquestration » quantitative par les différents types de matière organique qu'on peut rencontrer dans les sols, ainsi que sur la stabilité des complexes formés.

Ce n'est que tout récemment que Scheffer et ses collaborateurs (1957) ont tenté de déterminer le pouvoir complexant d'acides humiques de différentes origines vis-à-vis du fer, en présence de phosphates. A pH 7

[1] Pour plus de simplicité, nous définirons ce phénomène par le mot *complexe*, en donnant toutefois à ce terme un sens très large, en attendant d'étudier plus loin les différents modes de séquestration du fer susceptibles d'intervenir.

les acides humiques peuvent atteindre un pouvoir complexant équivalent à celui d'une solution d'EDTA (acide éthylène-diamine tétracétique) à 10^{-2} M.

Dans le présent travail nous nous sommes attachés à vérifier l'hypothèse de la complexation du fer par les extraits aqueux de feuilles mortes et, surtout, à étudier de façon quantitative et comparative le pouvoir complexant des différentes litières fraîches, ainsi que son évolution au cours de la décomposition.

Une méthode quantitative a été mise au point.

Principe de la méthode :

Lorsqu'on met en présence d'une solution contenant des ions ferriques ou ferreux une quantité suffisante de matière organique, la floculation du fer, qui devrait se produire en milieu basique, ne se fait pas. On possède là, par conséquent, une méthode pour évaluer le pouvoir complexant d'une matière organique en déterminant la quantité minimum de cette dernière, nécessaire pour empêcher la floculation du fer, à un pH donné et après un temps donné (1).

Mode opératoire :

Des quantités croissantes d'extraits de litière sont mises en présence de 2 cc de solution standard de sulfate ammoniacal de fer ferrique (1 cc correspond à 0,1 mg de Fer) dans une série de tubes à essais. Puis on complète à 10 cc avec de l'eau distillée. Après 24 heures de contact on ajoute dans chaque tube 5 cc de NaOH à 1 p. 100, pour amener les liqueurs à un pH nettement alcalin. Après une nouvelle période de 24 h on note le rapport limite litière/Fer, pour lequel il n'y a pas de floculation. Nous avons appelé ce rapport limite : *seuil de complexation*. On arrive ainsi à déterminer la quantité minimum d'extrait de litière nécessaire pour que le fer reste en solution.

Remarque :

Dans les tubes où une floculation se produit, celle-ci est en général totale. En effet, après acidification, le liquide surnageant ne donne plus aucune réaction au thiocyanate, ni à l'orthophénanthroline. On pourrait penser à priori que seul le fer resté libre floculerait et que la fraction complexée resterait en solution. Ce phénomène peut trouver une explication par le fait que $Fe(OH)_3$ colloïdal formé est capable d'adsorber le fer restant à l'état de complexe organique dans la solution. Ceci se conçoit d'au-

(1) Une méthode analogue a été utilisé par DEMOLON et BASTISSE (1938).

tant plus aisément si on admet que le complexe a une charge négative. DUCHAUFOUR (1953) a pu observer également une précipitation complète sous l'influence d'une solution de $CaCl_2$ et de NH_4OH.

a) INFLUENCE DU TEMPS DE CONTACT :

La séquestration du fer est instantanée. En effet, si on ajoute la soude immédiatement après la mise en contact du fer avec l'extrait, le seuil de floculation observé après 24 h est le même que si l'on ajoute la soude seulement après 24 heures de contact.

Le pouvoir complexant diffère donc en ce sens du pouvoir réducteur que dans le premier cas la réaction est instantanée, tandis que dans le deuxième cas nous avons vu que la réaction demandait un certain temps pour se réaliser totalement.

Cette constatation n'a évidemment pas d'intérêt pratique, car sur le terrain les solutions du sol sont suffisamment longtemps en contact avec les particules minérales pour que les réactions aient le temps de se produire.

b) INFLUENCE DU pH SUR LE SEUIL DE FLOCULATION DU FER EN PRÉSENCE D'EXTRAITS DE LITIÈRE :

La valeur du pH de 11,5, à laquelle ont été effectués les essais de floculation en milieu sodique, peut paraître un peu élevée et se trouve en tout cas en dehors des limites des valeurs de pH observées dans le sol. Aussi avons-nous cherché à savoir si le seuil de floculation demeurait le même à des pH inférieurs, ce qui revient à étudier la stabilité des complexes formés en fonction du pH.

Les mélanges extrait-fer étant très peu tamponnés, il fallait, pour fixer les valeurs de pH, utiliser des solutions tampons, et spécialement des tampons n'ayant pas eux-mêmes d'effet complexant sur le fer, comme c'est le cas pour la plupart des tampons classiques : phosphates, citrates, tartrates, lactates, etc... Nous avons choisi le tampon acide acétique-acétate, de MICHAELIS, et le tampon borax-acide borique, de POLITZSCH (BRUNEL, vol. 1, 1948).

L'expérience a été effectuée avec un extrait d'Aulne sur 10 cc de solution extrait-fer. Trois séries de tubes à essai ont été préparées, le rapport litière /fer s'étageant entre 0 /1 (solution de fer pure) et 40 /1. Après 24 h de contact entre l'extrait et le fer on a ajouté à *la première série* : 2,5 cc de tampon acétique 1 : 1 + 1,75 cc de soude à 1 p. 100 et complété à 15 cc avec de l'eau distillée.

A la deuxième série : 2,5 cc de tampon borique + 1,85 cc de soude à 1 p. 100.

A la troisième série : 5 cc de soude à 1 p. 100.

Les résultats montrent que dans ces conditions et pour les 3 valeurs

de pH obtenues : 4,8, 6,7 et 11,2 le seuil de complexation se situe entre 15/1 et 20/1. On peut, par conséquent, conclure que dans les limites de pH rencontrées dans le sol, ce dernier n'a pas d'influence sur la complexation du fer, en d'autres termes, que le fer semble pouvoir être séquestré avec la même intensité aux différents pH.

c) INFLUENCE DE LA QUANTITÉ ABSOLUE DE FER PRÉSENTE SUR LE SEUIL DE FLOCULATION.

DEB (1949) signale, en se référant aux travaux de MATTSON et de JOFFE, que la concentration en oxyde de fer des solutions provenant d'études d'horizons podzoliques au lysimètre était toujours inférieure à 100 p. p. m., ce qui représente une concentration de 1 mg pour 10 cc de solution. Dans nos essais, la concentration en Fe^{+++} était de 0,2 mg pour 10 cc. Nous sommes par conséquent largement au-dessous des possibilités de concentration en milieu naturel. Il était néanmoins intéressant de connaître l'influence de la quantité absolue de fer présente sur le seuil de floculation.

L'expérience suivante, effectuée avec un extrait de Charme, et dont les résultats figurent sur le tableau XXVI, montre que pour des concentrations croissantes de fer et de matière organique, le seuil de floculation reste sensiblement le même jusqu'à une concentration de 0,5 mg de Fe pour 10 cc. Au-dessus de cette valeur, le maintien du fer en solution nécessite une teneur *relativement* plus élevée en matière organique.

TABLEAU XXVI

Influence de la quantité absolue de fer présente sur le seuil de complexation, à pH 11,5. Observations faites 24 heures après addition de la soude.

Quantité de fer présente en mg pour 10 cc	Rapports litière fer entre lesquels s'effectue la floculation
0,05	15-20
0,1	20-25
0,15	— —
0,2	— —
0,3	— —
0,4	— —
0,5	— —
0,6	35-40

d) INFLUENCE DE LA DURÉE DE FLOCULATION.

Nous avons dit, à propos du mode opératoire, qu'on notait le seuil de complexation 24 h après addition de la soude. Cette durée est purement arbitraire, mais permet des mesures assez rapides. Si on suit la floccula-

tion du fer dans les tubes à essai en fonction du temps (tableau XXVII), on s'aperçoit que le rapport litière/fer au seuil de complexation, qui est de 28 pour le Charme après 24 h, passe de façon asymptotique à 44,5 après 30 jours. En d'autres termes, la quantité de fer restant en solution sous l'influence de l'extrait de 100 g de litière de Charme, passe de 3,5 g à 2,25 g. Exprimée par rapport à 1 g de substance hydrosoluble, la quantité de fer complexée de façon quasi définitive après 30 jours est de 0,2 g.

TABLEAU XXVII

Influence de la durée de floculation sur la valeur du rapport litière/fer au seuil de complexation.

	Rapport litière/fer au seuil de floculation	g de fer complexé par l'extrait de 100 g de litière de Charme à pH 11,5
Après 24 heures	28	3,57
— 48 —	32,2	3,05
— 72 —	37	2,7
— 96 —	37	2,7
— 5 jours	43,5	2,3
— 12 —	43,5	2,3
— 15 —	43,5	2,3
— 30 —	44,5	2,25

1. — Le pouvoir complexant des litières fraîches.

a) CAS DU FER FERRIQUE.

Les résultats figurent sur le tableau XXVIII. Deux modes d'expression des résultats ont été adoptés :

1° Quantité de fer, en grammes, complexée par 100 g de litière : c'est ce que nous avons appelé *pouvoir complexant.*

2° Quantité de fer, en grammes, complexée par 1 g de matière hydrosoluble.

Dans les deux cas, nous indiquons également le *seuil de complexation.* C'est le rapport litière/fer ou matière hydrosoluble/fer minimum nécessaire pour maintenir le fer en solution.

On s'aperçoit, en étudiant les deux premières lignes du tableau, qu'on peut distinguer deux groupes d'espèces : les feuillus, moins le Hêtre, qui possèdent un pouvoir complexant très élevé, et le groupe comprenant les résineux et le Hêtre avec un pouvoir complexant de 4 à 5 fois moins élevé. Parmi les premiers, l'Aulne se singularise par des valeurs très fortes.

Si on exprime les résultats en se référant non plus aux litières, mais à leurs produits hydrosolubles, on voit que, comme pour le pouvoir réducteur, les substances hydrosolubles du Hêtre et des résineux sont moins

actives que celles des feuillus. La différence entre les deux groupes n'est cependant pas aussi grande que celle que nous avions observée dans le cas du pouvoir réducteur (comparer les tableaux XXVIII et XXIV). Ici également, nous pouvons conclure que les propriétés intrinsèques des substances entrant dans la composition des extraits ne sont pas les mêmes dans les deux groupes d'espèces.

TABLEAU XXVIII

Complexation du fer ferrique par les extraits aqueux à froid de différentes litières. Résultats exprimés par rapport à la litière et par rapport à la matière hydrosoluble de cette dernière.

	Aulne	Charme	Chêne péd.	Chêne r.	Hêtre	Épicéa	Pin	Sapin
Rapport litière/fer au seuil de complexation	19,4	28	31	27	108	133	132	136
g fer complexé par l'extr. de 100 g de litière	5,16	3,57	3,23	3,71	0,95	0,75	0,76	0,73
Rap. mat. hydrosol./fer au seuil de complexation	3,85	3,25	3,4	3,2	5,9	6,4	5,2	5,6
g fer complexé par g de substance hydrosoluble	0,26	0,31	0,29	0,31	0,17	0,16	0,19	0,20

b) CAS DU FER FERREUX :

Quelques expériences dans lesquelles le fer ferrique a été remplacé par du fer bivalent ont montré que ce dernier nécessitait moins de matières organiques que Fe^{+++} pour être complexé (tableau XXIX). DEMOLON et BASTISSE (1938) font la même observation dans le cas des complexes sili-

TABLEAU XXIX

Complexation comparative de Fe^{+++} et Fe^{++} par les extraits de litière.

	g fer complexé par 100 g de litière	Rapport litière/fer au seuil de complexation
Aulne Fe^{+++}	5,16	19,4
Fe^{++}	6,9	14,5
Charme Fe^{+++}	3,57	28
Fe^{++}	5,0	20

ciques. Cependant, dans les deux cas, lorsque le rapport litière/fer est inférieur au seuil de complexation, le fer flocule à l'état de $Fe(OH)^3$ de couleur rouille. Il semble qu'en présence NaOH, Fe^{++} soit rapidement oxydé. Ce phénomène se produit également dans les expériences où nous avons

pris soin de recouvrir le liquide d'une couche d'huile de paraffine pour le maintenir à l'abri de l'oxygène de l'air.

A quel processus sont dues, dans ces conditions, les différences observées ? On peut émettre l'hypothèse suivante : la matière organique des extraits étant réductrice, une partie du fer ferrique mis en sa présence est réduite. Cependant, cette réduction est obligatoirement accompagnée d'une oxydation concomitante de la matière organique qui fonctionne comme donateur d'électron, d'après la formule ci-après :

$$Fe^{+++} + e = Fe^{++}$$

Dans le cas où l'on travaille avec du fer ferreux, il ne se produit pas d'oxydation de la matière organique.

Dans ces conditions, il est vraisemblable que les différences doivent être imputées à un pouvoir complexant plus faible de la matière organique oxydée par rapport à celle qui ne l'est pas.

2. — Évolution du pouvoir complexant au cours de la décomposition.

a) En milieu aérobie :

Lorsqu'on fait décomposer les litières à l'étuve à 27° et en milieu bien aéré, la teneur en matière hydrosoluble subit une forte baisse pendant

Tableau XXX

Complexation du fer par les extraits de différentes litières décomposées à l'étuve pendant des durées variables.

Essences	Durée de décomposition	g fer complexé par 100 g lit.	Seuil de complexation
Aulne	0	5,15	19,4
	15 jours	4,0	25
	1 mois	5,85	17
	2 mois	2,7	37
	3 mois	0,83	115
	5 mois	2	50
Charme	0	3,6	28
	15	3,35	30
	1	3,35	30
	2	2,56	39
	3	2,0	50
	5	1,33	75
Épicéa	0	0,75	133
	1	0,74	134
	3	0,59	170
	5	0,55	180
Pin	0	0,76	132
	1	0,51	195
	3	0,59	170
	5	0,45	220

les premiers mois, particulièrement prononcée chez les feuillus, comme nous l'avons fait remarquer au premier chapitre (fig. 1).

Parallèlement à cette observation, on constate une forte diminution du pouvoir complexant chez ces derniers (tableau XXX). Ainsi, chez le Charme, cette valeur passe de 3,6 à 1,33 g de fer complexé par 100 g de litière, au bout de 5 mois de décomposition. Chez l'Aulne, les chiffres respectifs sont de 5,15 et de 2. Au contraire, avec les deux resineux, Epicéa et Pin, la diminution n'est qu'extrêmement faible (fig. 26).

b) En milieu anaérobie :

De même que pour l'acidité et le pouvoir réducteur, le pouvoir complexant des extraits résultant d'une décomposition anaérobie est

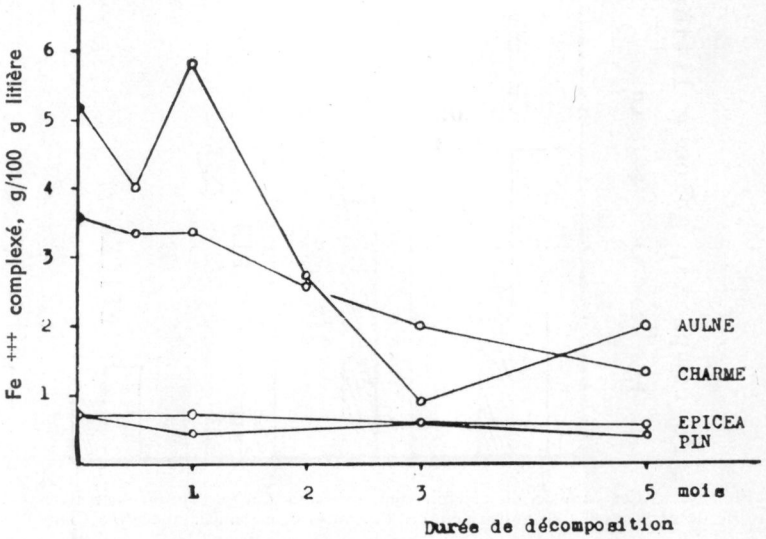


Fig. 26. — Évolution du pouvoir complexant de quelques litières au cours de leur décomposition.

différent de celui observé avec les extraits obtenus en milieu aéré. Les résultats (fig. 27) après 1 mois de décomposition illustrent bien ces différences. Ainsi, pour le Pin, le pouvoir complexant est trois fois plus élevé avec l'extrait anaérobie qu'avec un extrait aéré. Chez les autres espèces, l'augmentation est comprise entre les rapports 1,6 et 1,9.

3. — Stabilité des complexes extraits-Fer.

a) En milieu calcaire :

La grande stabilité des complexes extraits-fer, a pu être mise en évidence par une expérience de migration « *per ascensum* » en tube.

300 g d'un mélange comprenant 87 p. 100 de sable fin de Fontainebleau et 13 p. 100 de carbonate de calcium pur pulvérulent sont introduits dans un tube de verre de 30 mm de diamètre au-dessus d'une mince couche de sable pur. L'ensemble, maintenu en place par une couche de gaze et un bouchon muni d'un tube de verre, est saturé d'eau par imbibition. Puis la base du tube est plongée dans une solution contenant de l'extrait d'Aulne à 0,24 g de litière par litre + 10 mg de $FeCl_3$ et une trace de NaN_3 destinée à inhiber les fermentations. Pour accélérer la remontée de la solution par capillarité, la partie supérieure du tube a été soumise au rayonnement d'une lampe de 40 watts.

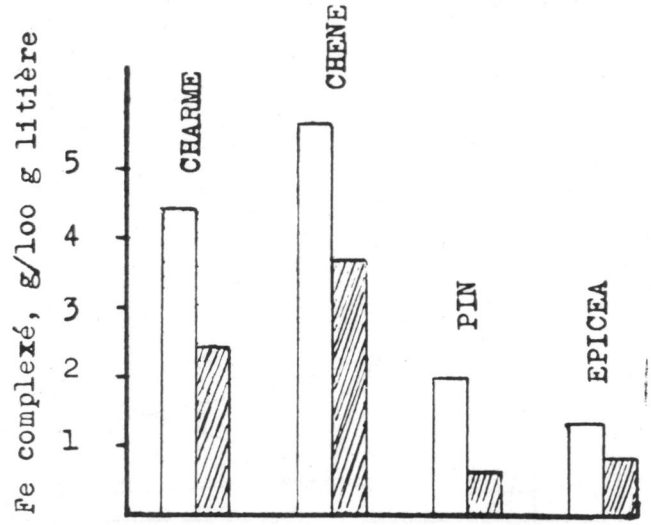


FIG. 27. — Comparaison du pouvoir complexant de quelques litières après 1 mois de décomposition : en milieu aérobie (hachuré) et en milieu anaérobie (blanc).

La même expérience a été effectuée avec une solution témoin renfermant uniquement 10 mg de $FeCl_3$ par litre.

Après un mois, 900 cc de liquide ont traversé la colonne. Le fer s'est déposé sous forme d'une bande irrégulière de 2 mm d'épaisseur, à 6 cm au-dessus de la base du tube. Une légère bande est visible à 10 cm, ainsi qu'un dépôt assez important à la partie supérieure du mélange, c'est-à-dire à 19 cm de la base. Le fait qu'une partie du fer s'est déposée en cours de route est dû au dessèchement progressif de la partie supérieure de la colonne, consécutif au rayonnement trop puissant de la lampe.

Dans une expérience analogue, le fer a été dosé à différents niveaux de la colonne. Le tiers inférieur a recelé 0,34 mg, l'intermédiaire 0,9 et le supérieur 2,12 mg.

Dans le tube témoin, le fer se trouve localisé à la fin de l'expérience sous forme d'une tache rouge dans le sable pur de la base du tube et de façon diffuse dans le premier centimètre du mélange calcaire, comme le montre la photographie nº 3. Le rapport litière/fer était de 44 dans ces expériences, valeur très supérieure au seuil de complexation qui, comme nous l'avons vu, était de 19,4 pour l'Aulne.

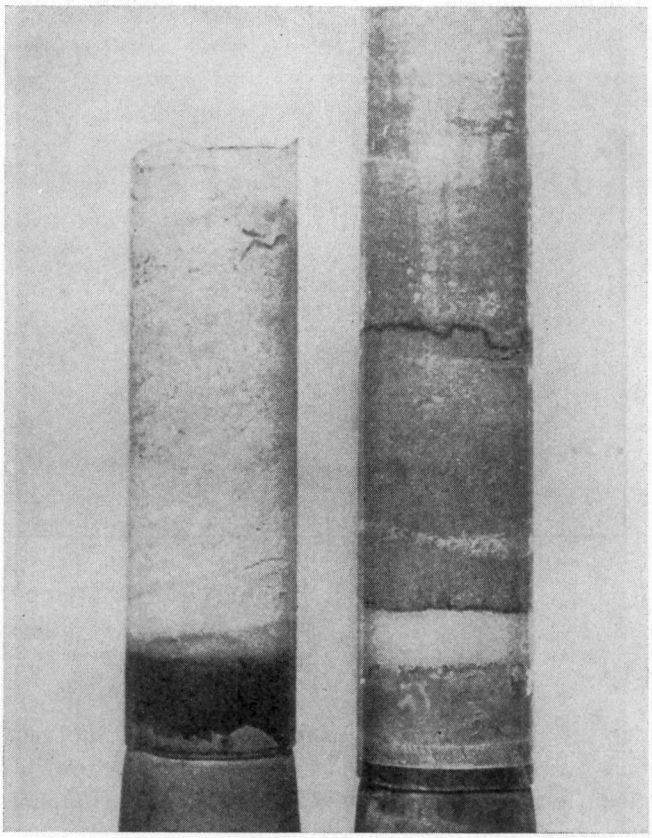


Photo 3. — Migration « *per ascensum* » du complexe extrait d'Aulne-fer dans un tube renfermant du sable à 13 p. 100 de calcaire (à droite). Au gauche, témoin traité avec une solution pure de $FeCl_3$.

b) Influence des ions Ca^{++} :

En vue de l'étude de l'influence des ions calcium sur la valeur du seuil de complexation, des quantités croissantes de $CaCl_2$ ont été ajoutées aux solutions extraits-fer et la résistance à la floculation en milieu alcalin mesurée par la méthode habituelle. Les concentrations en ions Ca^{++} utilisées se situent entre 0,2 et 1 mg de Ca^{++} par tube de 10 cc. Ces concentrations se rencontrent couramment dans les extraits de terre. Ainsi,

BARBIER (cité par DEMOLON, 1952), trouve des teneurs en Ca^{++} allant de 55 à 105 p.p.m. dans des extraits de sols de limons, le rapport terre/eau de la suspension ayant été de 1. La concentration maximum utilisée dans nos expériences est de 1 mg Ca^{++} pour 10 cc (= 100 mg/litre = 100 p. p.m.).

On voit, d'après la courbe de la figure 28, que la quantité de fer complexé après 24 heures diminue très fortement, lorsque la concentration en calcium augmente. Elle a tendance à devenir nulle pour une concentration supérieure à 100 p.p.m.

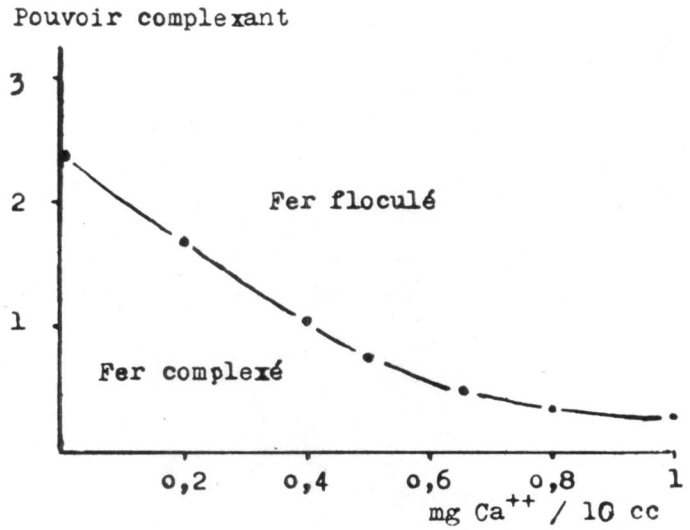


Fig. 28. — Etude du pouvoir complexant (g fer complexé p. 100 g litière) en présence de quantités croissantes d'ions Ca^{++}, d'un extrait de litière de Chêne décomposée pendant 1 mois.

Cette constatation nous paraît extrêmement importante et la courbe illustre de façon très nette l'influence générale de la désaturation en bases, particulièrement en Ca^{++} des sols sur l'intensité des phénomènes de complexation, par conséquent de lessivage du fer.

4. — Nature des complexes formés.

a) CAS GÉNÉRAL :

Différents modes de complexations du fer dans le sol peuvent être envisagés :

— *complexe colloïdal,*

— complexes vrais (*complexes de Werner et chélates*).

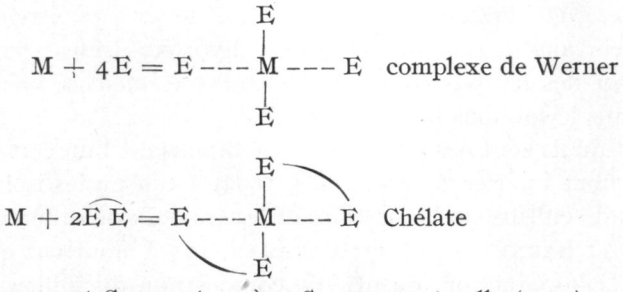
Le premier mécanisme semble être le plus important et a été remarqué depuis fort longtemps.

Cependant, la complexation du fer sous forme de *chélate* est devenue de grande actualité depuis la découverte assez récente d'agents complexants artificiels, tels l'EDTA ou acide éthylène-diamine-tétra-acétique (= Complexon III de SCHWARZENBACH), le HEEDTA ou acide hydroxy-éthyl-éthylène-diamino-triacétique, etc... dont la liste s'allonge continuellement, qui sont capables de former des complexes solubles et stables sur une grande gamme de pH avec un certain nombre d'ions métalliques.

L'intérêt de ces substances réside principalement dans le traitement des chloroses dues à une carence ferrique et dans l'étude de l'insolubilisation de P_2O_5 dans le sol par des ions tels que le Fer, l'Aluminium et le Calcium (BROWN, 1956). Cependant, devant le nombre croissant de publications ayant trait aux phénomènes de chélation en chimie agricole et en pédologie, il nous paraît nécessaire de préciser brièvement quelques points relatifs à ces derniers, et notamment de faire la distinction entre les complexes ordinaires, du type *complexe de Werner* et *les chélates*.

Chez presque tous les complexes minéraux (à l'exception de ceux de l'acide phosphorique), les ions complexants qui entourent l'ion métallique ne sont pas reliés entre eux. Ce sont les *complexes de Werner*.

Sous le terme de *chélates*, on comprend des complexes dans lesquels deux ou un nombre plus grand de molécules (souvent organiques) sont reliées entre elles par des liaisons homopolaires (voir schéma ci-dessous). Il y a formation de cycles, et l'ion central étant emprisonné comme dans une pince, on appelle ces complexes des chélates (SCHEFFER et collab., 1957).



d'après MARTELL et CALVIN (1952) et SCHEFFER et coll., (1957).

Il existe un grand nombre d'agents chélatants, mais les donateurs d'électrons qui sont capables de contracter de telles liaisons se limitent à N,O et S.

Depuis la découverte des agents chélatants artificiels, certains auteurs, comme SCHATZ et coll. (1954) et BECKWITH (1955) insistent sur l'importance de la chélation en pédogenèse et ce dernier trouve que l'humus, la lignine et certains composés complexes formés par les bactéries,

les champignons, les lichens, les plantes supérieures peuvent former de tels complexes avec les métaux.

SWINDALE et JACKSON (1956) ont introduit le terme de « chéluviation » et décrivent le phénomène comme un processus dans lequel les minéraux sont décomposés par chélation en solution et éluviés.

Cependant, l'emploi du terme chélate pour désigner les complexes organo-ferriques de la solution du sol, nous paraît abusif, du moins dans l'état actuel de nos connaissances. En effet, aucun auteur n'a pu démontrer jusqu'à présent, la formation de tels chélates par la matière organique du sol, avec les méthodes d'études récentes (MARTELL et CALVIN, 1952). Ainsi, ALBERT (1950) a trouvé que les alpha-aminoacides ne formaient pas de chélates avec les ions ferriques.

Par contre, ATKINSON et WRIGHT (1957), ont pu montrer que les agents chélatants synthétiques, tel que l'EDTA, étaient capables de mobiliser et de faire migrer le fer dans des expériences en colonnes de percolation.

Parmi les différents agents naturels de complexation envisagés par les auteurs, tels :

la silice (REIFENBERG, 1927 ; DEMOLON et BASTISSE, 1938) ;

les acides humiques (AARNIO, 1913 ; DEB, 1949) ;

les acides fulviques (WILLIAMS, JOFFE, 1949 ; DUCHAUFOUR, 1957) ;

les tanins (LAATSCH, 1937 ; THORP, 1957) ;

les hydroxy-acides (BASTISSE, 1945 ; GALLAGHER, 1942, etc.), les quatre premières substances sont de nature colloïdale. Elles existent dans le sol et sont par conséquent susceptibles d'intervenir. La formation de complexes colloïdaux entre ces produits et le fer a pu être démontrée. De même certains acides organiques et hydroxy-acides sont capables de contracter des liaisons complexes avec cet élément. Cependant, leur efficacité dans le sol nous paraît discutable.

On sait qu'ils sont des produits du métabolisme d'un certain nombre de champignons inférieurs (MOLLIARD, 1922). On a pu les isoler dans des expériences de culture au laboratoire et les travaux de différents auteurs (voir LILLY et BARNETT, 1951 et WAKSMAN, 1952) montrent que les conditions d'oxydo-réduction, de pH, de composition du milieu de culture jouent un grand rôle dans la nature et la quantité d'acides formés.

Il est vraisemblable que les départs de fer observés par certains chercheurs (ALLISON et SCARSETH, 1942 ; BETREMIEUX, 1951) dans des expériences de fermentation en présence de glucose sont dus à la formation de tels acides.

En effet, MOLLIARD a montré que *Sterigmatocystis nigra* était capable de transformer une partie du sucre mis à sa disposition en acide citrique lorsque le milieu de culture contenait peu de substances azotées.

On ne possède pas, à l'heure actuelle, de renseignements sur la présence de ces acides dans les sols. Il est très probable que, s'ils apparaissent, ils sont immédiatement métabolisés par d'autres microorganismes pour être complètement minéralisés (CO_2, H_2O) ou réutilisés pour la synthèse des constituants cellulaires (POCHON et de BARJAC, 1958, p. 179).

b) CAS DES COMPLEXES FORMÉS PAR LES EXTRAITS DE LITIÈRE :

BLOOMFIELD (1953-1955) a noté la formation de complexes stables entre la matière organique des extraits de litière et le fer, avec différentes espèces telles *Dacrydium cupressinum*, *Pinus sylvestris*, *Agathis australis*, *Larix europaeus*, *Fraxinus excelsior*.

Cependant, cet auteur n'a pas spécifié de quels types de complexes il s'agissait. C'est à DELONG et SCHNITZER (1955) que revient le mérite d'avoir les premiers tenté de déterminer leur nature. En utilisant les méthodes d'étude des chélates de MARTELL et CALVIN (1952) ces auteurs ont pu montrer que dans le cas d'extraits de *Populus grandifolia* il n'y avait pas formation de complexes de ce type. Ainsi, en faisant des titrations potentiométriques d'extraits, en présence ou en l'absence de fer, les courbes ne montrent pas les anomalies qui devraient se produire si l'on était en présence de chélates vrais. D'autre part, les courbes d'absorption de la lumière dans l'ultra-violet et le violet, entre 220 et 400 mμ, ne présentent non plus de maximum imputable à la présence de complexes solubles du fer, du type chélate. DELONG conclut, que « la fonction primordiale de la matière organique des extraits est d'agir comme agent peptisant et comme colloïde protecteur vis-à-vis du fer ».

Nous avons pu confirmer l'hypothèse de DELONG,

— en démontrant la nature colloïdale des extraits de litières ;

— en effectuant des titrations potentiométriques.

L'examen des extraits de litière dans un faisceau de lumière à rayons parallèles nous a montré que ces derniers présentaient de façon très nette le phénomène de TYNDALL. D'autre part, l'observation de quelques gouttes de la solution à l'ultramicroscope, nous a permis de mettre en évidence les particules. Les extraits sont par conséquent des solutions colloïdales. D'ailleurs, la présence de tanins, en grande quantité dans la majorité des extraits, confirme cette idée. En effet, on sait que les tanins donnent en présence d'eau des pseudo-solutions (hydrosols), dont par ailleurs la stabilité est fonction d'un certain nombre de facteurs, tel que le pH. Ainsi, en milieu acide, l'addition d'électrolytes peut les faire floculer. De même, en milieu d'acide chlorhydrique très concentré, une fraction des extraits flocule. Nous pensons qu'il s'agit de tanins, et non d'acides humiques. Au fur et à mesure que le pH s'élève, la quantité d'ions Ca^{++} nécessaire pour les floculer devient de plus en plus grande, ce qui semble indiquer un degré de dispersion du colloïde croissant avec le pH.

Lorsqu'on effectue une titration potentiométrique avec une base, d'un mélange de deux substances qui ne forment pas de complexe vrai, la courbe obtenue a une allure analogue aux courbes résultant de la titration des deux composants pris séparément.

Lorsque, par contre, les deux substances peuvent former un complexe du type chélate, suivi d'une libération d'ions hydrogène, on obtient une image différente. La nouvelle courbe a une allure totalement indépendante de celles des deux agents pris isolément. ALBERT (1950) a utilisé cette méthode dans le cas d'alpha-aminoacides et a pu démontrer, de ette fa çon, que ces derniers étaient capables de former des complexes vrais avec certains métaux lourds bivalents. Ce phénomène ne se produit pas avec les ions ferriques.

Nous avons étudié à l'aide de cette méthode un extrait d'Aulne enrichi en fer. La courbe obtenue est absolument parallèle à celles des deux composants titrés isolément. Cette expérience confirme les résultats de SCHNITZER et DELONG (1955). *Les extraits de litière ne sont pas capables de former avec le fer des complexes du type chélate,* et nous concluons avec cet auteur que *l'action des litières est due à un effet de peptisation et de protection de l'hydroxyde de fer colloïdal par leurs extraits.*

Il s'agit par conséquent d'un phénomène analogue à celui qui a été observé depuis longtemps pour les acides humiques.

D. — ROLE DES POLYPHÉNOLS

Le rôle des polyphénols dans la mobilisation du fer a déjà été démontré dans le cas des racines de Chêne dès 1937 par LAATSCH. Cet auteur a prouvé par des expériences de laboratoire que les tanins sont à l'origine de la « marmorisation » des horizons A et BG des sols de Chênaies où l'eau stagnante forme temporairement une nappe perchée.

En présence d'une eau suffisamment riche en O_2, le fer se déplacerait sous forme d'une suspension tanno-ferrique, alors qu'en milieu fortement réducteur il se déplacerait sous forme d'ions ferreux.

THORP (1957) a pu montrer par des expériences de percolation en tubes que l'acide gallique était capable de dissoudre des quantités appréciables de fer.

Les résultats que nous avons obtenus avec des extraits de différentes litières montrent un parallélisme très net entre la richesse en polyphénols, matérialisée par la couleur foncée des extraits, et les départs de fer. Tout le groupe des feuillus, Hêtre excepté, est très riche en ces substances (7,2 p. 100 chez 'Aulne), alors que les Conifères en sont très pauvres (0,14 p. 100 chez le Pin) (voir Chap. I).

D'autre part les tanins pourraient exercer une influence indirecte sur la migration du fer par leurs propriétés défloculantes bien connues

vis-à-vis des colloïdes argileux. Ainsi, on ajoute des tanins aux boues de forage des sondages dans les prospections géologiques, d'une part pour empêcher la floculation des argiles au contact des couches marneuses ou salifères riches en ions floculants, d'autre part pour diminuer la viscosité de ces boues. BLOOMFIELD (1956) a mis en évidence expérimentalement le pouvoir défloculant des extraits d'écorce de Kauri (*Agathis australis*) et de Rimu (*Dacrydium cupressinum*), deux Conifères néo-zélandais, vis-à-vis de la kaolinite.

Il est permis de penser qu'à la suite de la dispersion de l'argile par les polyphénols des litières, du fer se trouve libéré et mis en solution.

III. — ESSAI D'ÉTABLISSEMENT DU ROLE RESPECTIF DES DIFFÉRENTS FACTEURS

Les différences de comportement des diverses litières dans les processus de solubilisation et de transport du fer peuvent être attribuées à un certain nombre de facteurs que nous venons de passer en revue :

— acidité,
— pouvoir réducteur,
— pouvoir complexant,
— tanins.

Quel est le rôle respectif de ces différents facteurs ?

A. — **L'acidité** semble jouer un rôle double : direct et indirect.

La corrélation très étroite entre l'acidité titrable et la mobilisation du fer, la diminution de la solubilisation après neutralisation des extraits, font penser que les fonctions acides — vraisemblablement en grande partie les fonctions carboxyliques et phénoliques — interviennent *directement* dans la solubilisation du fer. Cette observation peut être confirmée par l'étude du tableau récapitulatif (tableau XXXI). Ainsi, malgré un pouvoir réducteur et complexant supérieur à ceux du Charme, l'Aulne provoque un départ de fer moins important qui est probablement dû à l'acidité titrable moins élevée. Il en est de même de l'extrait de Hêtre qui, avec une acidité titrable faible et malgré un pouvoir réducteur et un pouvoir complexant supérieurs à ceux des résineux, dissout moins de fer.

Par conséquent, l'acidité semble jouer un *rôle limitatif* dans la mise en solution des sesquioxydes.

On peut également envisager un rôle *indirect* de cette acidité par son action favorable sur la réduction du fer ferrique aux fortes concentrations en ions hydrogène (voir fig. 19).

B. — **Le pouvoir réducteur** des extraits n'est important qu'aux pH bas, inférieurs à 6. Il semble par conséquent qu'en milieu aéré, ce processus n'intervienne que dans les sols présentant déjà un début de lessivage des bases.

Notons cependant, que cet effet de réduction peut être très appréciable en milieu acide sans que des phénomènes d'anaérobiose n'interviennent, et que dans ces conditions de pH, le fer ferreux est relativement assez soluble.

C. — **Le pouvoir complexant** est indépendant du pH.

Par contre, il dépend du pouvoir réducteur. En effet, nous avons vu que le fer ferreux nécessite moins de matière organique que le fer ferrique pour être complexé (tableau XXIX).

D'autre part, une même quantité de matière organique réduit beaucoup moins de fer qu'elle n'est capable d'en complexer. Ce résultat, qui est valable pour toutes les espèces étudiées, ressort de la figure 29.

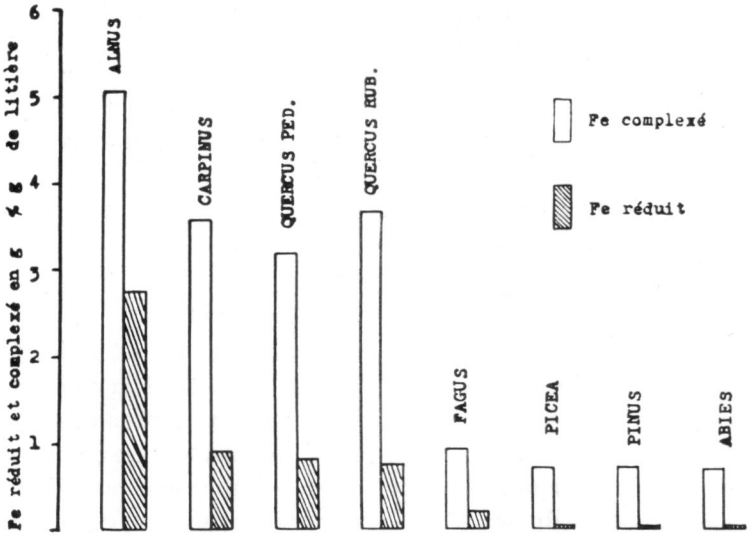


Fig. 29. — Fer réduit et complexé, en g pour 100 g de litière.

En réalité, sur le terrain, on peut s'attendre à une différence encore plus grande entre ces deux phénomènes, puisque au pH des sols, le pouvoir réducteur est nettement plus faible qu'à pH 2,5.

On voit que, pour qu'il puisse migrer, il n'est pas nécessaire que le fer soit réduit. Ce résultat rejoint une observation faite par DUCHAUFOUR (1953). Cet auteur observe une libération de fer importante dans un milieu contenant de l'eau oxygénée et de la matière organique. Le fer était alors nécessairement à l'état ferrique.

Une autre constatation intéressante mérite d'être signalée. Si on fait les rapports entre pouvoir complexant et pouvoir réducteur (tableau XXXI et fig. 29), on s'aperçoit que ces derniers sont élevés pour les trois Conifères. En d'autres termes, le pouvoir réducteur est beaucoup moins important chez ces trois espèces que chez les feuillus. Le Hêtre

occupe une position intermédiaire. Cette observation peut être mise en rapport avec la plus grande richesse des extraits de feuillus en polyphénols, substances dont on sait qu'elles ont des propriétés réductrices remarquables (MEUNIER et VANEY, 1936 ; LAATSCH, 1937).

D. — **Les polyphénols** semblent jouer un grand rôle dans ces différents phénomènes. Nous avons vu que les différences dans la composition chimique des deux groupes d'espèces mis en évidence résidaient essentiellement dans une teneur plus élevée du groupe des feuillus en tanins (tableau XXXI). Or ces derniers montrent une acidité titrable très élevée qui est vraisemblablement liée à la grande richesse en fonctions acides des tanins. Ces substances interviennent également par leur pouvoir réducteur.

TABLEAU XXXI

TABLEAU RÉCAPITULATIF

Les résultats sont exprimés par rapport à l'extrait à froid de 100 *g de litière sèche.*

Essences	mg Fe_2O_3 solubilisé	g matières hydrosolubles	Acidité titrable m. éq.	Pouvoir réducteur g	Pouvoir complexant g	Rapport p. compl. p. réduct.	Tanins	
							qual.	quant.
Aulne	98	15,05	14,4	2,72	5,16	1,88	+++	7,23
Charme	119	15,6	19,2	0,92	3,57	3,9	+++	—
Chêne péd.	134	9,2	15	0,83	3,23	3,9	+++	—
Chêne rouge	101	11,5	9,75	0,77	3,71	4,8	+++	—
Hêtre	1,6	5,9	2,85	0,18	0,95	5,3	+	—
Épicéa	4,7	4,7	3	0,07	0,75	10,7	0	—
Pin	5,3	4,1	7,5	0,06	0,76	12,6	0	0,14
Sapin	—	4,4	8,25	0,05	0,73	14,6	0	—

La cause de la diminution de ce dernier, lorsque l'acidité diminue, peut être attribuée en partie aux tanins. En effet, au fur et à mesure que le pH s'élève, ces derniers ont tendance à s'oxyder. Un exemple nous est fourni par le pyrogallol (triphénol) qui est utilisé couramment comme absorbant d'oxygène, en milieu basique.

Quant au pouvoir complexant élevé des feuillus, on peut également en rendre responsables en grande partie ces produits, qui sont de nature colloïdale.

E. — L'effet favorable de **la décomposition anaérobie** des litières sur la mobilisation du fer est dû à plusieurs facteurs parmi lesquels, les conditions réductrices du milieu ainsi créé, jouent certainement un grand rôle.

Cette influence est cependant encore renforcée par le fait que les substances organiques qui prennent naissance en milieu appauvri en oxygène sont plus actives, à la suite d'une plus grande acidité, d'un pou-

voir réducteur plus intense et d'un pouvoir complexant également plus important (tableau XX ; fig. 25 et 27).

Il semble qu'à la suite de ces quelques observations il faille séparer dans le mode d'action des lessivats de litières, deux processus :

1° **La solubilisation du fer**, favorisée de façon directe par l'acidité des extraits et par leur pouvoir réducteur, les deux étant sous la dépendance de la tension en oxygène du milieu de décomposition et le deuxième étant également fonction du pH.

Les tanins sont en partie responsables de ce processus, grâce à leur caractère acide et à leurs propriétés réductrices.

2° **Le transport du fer** qui peut se faire grâce aux propriétés complexantes des extraits, dues à leur nature colloïdale. Ici également, les tanins semblent jouer un rôle prépondérant.

DISCUSSION

La constatation de l'effet solubilisant plus important de certains feuillus que celui des résineux vis-à-vis des composés du fer, telle qu'elle ressort de cette étude, est à première vue troublante.

En effet, il est bien connu, et unanimement admis que dans nos régions, les Conifères et en particulier le Pin jouent un grand rôle dans le phénomène de la podzolisation, alors que sous certains feuillus cette dernière ne se produit pas.

Cependant, la distinction faite par DUCHAUFOUR (1951, 1957) entre le *lessivage* et la *podzolisation* permet de concilier nos résultats expérimentaux avec ceux qu'on observe sur le terrain.

Rappelons que d'après cet auteur, ces deux phases d'évolution des sols sont liées à la présence de types d'humus différents. Le lessivage est un entraînement modéré de bases, de fer et d'argile, se produisant sous l'influence d'un humus forestier à décomposition rapide (mull). La podzolisation, par contre, a lieu à la suite de la formation d'une couche d'humus brut (mor). Elle se traduit par une destruction de l'argile et un entraînement massif du fer et de l'aluminium.

Les phénomènes généraux du lessivage, provoqués par les peuplements forestiers, en opposition avec les formations herbacées ou culturales, ont pu être mis en évidence par des études comparatives de sols formés sous des pelouses ou des prairies naturelles et de sols anciennement boisés.

Ainsi, BRAY (cité par JENNY, 1941) a pu montrer que les horizons supérieurs des profils de loess de l'Illinois (U. S. A.) avaient une teneur en bases échangeables plus faible et un pH plus bas sous la forêt que sous la « prairie ».

Nous-même avons pu observer que les sols alluviaux au nord de Strasbourg, qui avaient été très anciennement déboisés, ne sont pas aussi évolués que ceux qui sont restés boisés depuis leur origine (LOSSAINT, 1951). Ainsi dans les meilleures stations de la forêt, les rapports de lessivage du fer et du calcium sont plus élevés que dans les terres actuellement cultivées. Cette différence est vraisemblablement due à la matière organique acide apportée annuellement par la litière. Le sol s'appauvrit par suite du lessivage. Cependant sous feuillus (Aulne, Charme en particulier), ce lessivage ne dépasse pas un certain stade. Sous les peuplements de Conifères par contre, l'apport sur un substratum lui-même déjà appauvri, d'une litière peu riche en éléments pouvant favoriser sa décomposition, provoque l'accumulation d'humus brut qui entraîne le déclenchement d'un autre processus plus intense : la podzolisation.

Il est permis de penser que les lessivats des feuilles en décomposition interviennent dans la première phase : celle du lessivage. C'est également l'opinion de DUCHAUFOUR (1957).

Quant au processus de podzolisation, il paraît être moins étroitement lié aux propriétés physico-chimiques des essences que nous avons mises en avant, mais plutôt aux modes de décomposition de leurs litières.

Ainsi la formation de mor et l'installation de la podzolisation peuvent se produire également sous certains feuillus. On sait par exemple que le Hêtre peut former tantôt un mull, tantôt un mor, selon la richesse relative du sol.

Il en est de même du chêne et THORP (Communication personnelle) nous signale que « dans l'État de Michigan, les podzols les plus développés se rencontrent sous couverture d'Érable et de Bouleau. En Floride et le long de la côte atlantique de la Géorgie du Sud, on trouve des podzols sous des peuplements naturels de Chênes et de *Pinus palustris*. »

D'autre part, un aspect nouvellement abordé, essentiellement microbiologique, du problème du lessivage et de la podzolisation, mérite la plus grande attention. Ainsi le *rôle de la microflore* des sols, dans le phénomène de podzolisation, a été étudié par ARISTOVSKAYA (1956). Cet auteur attribue une grande importance au milieu nutritionnel des microorganismes et observe une production d'acides organiques extrêmement élevée lorsqu'elle les cultive sur des milieux appauvris par rapport aux milieux de culture normaux, malgré une prolifération moins intense.

On peut également se demander dans quelle mesure les substances libérées au cours de la décomposition des litières dans *les conditions naturelles*, parviennent à migrer en profondeur.

On ne possède pas de données à ce sujet, mais il est évident que tous ces produits n'arrivent pas à percoler et qu'une partie est métabolisée sur place ou après un faible déplacement. On peut cependant penser qu'ils migrent d'autant plus profondément qu'ils sont plus réfractaires à

l'attaque microbienne ou que l'activité des micro-organismes présents est plus faible.

D'autre part, une partie de ces produits est certainement adsorbée par les colloïdes du sol.

Enfin, un autre facteur particulièrement important et qui n'est pas reproductible dans les expériences de laboratoire, est constitué par l'activité de la faune. Celle-ci, par son effet de brassage et de digestion, efface partiellement l'effet du lessivage.

On voit que des problèmes nouveaux apparaissent, problèmes qui semblent cependant pouvoir être résolus grâce aux techniques développées dans ce travail et par la prise en considération des quelques remarques formulées ci-dessus.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

De l'ensemble des recherches sur le rôle des litières dans la mobilisation du fer, exposées ci-dessus, on peut dégager les conclusions suivantes :

1° Les litières fraîches et leurs extraits sont capables de solubiliser des quantités plus ou moins importantes de fer, aussi bien dans un sol de limon que dans un sable ferrugineux.

2° Cette activité mobilisatrice du fer est variable d'une litière à l'autre. Deux groupes d'espèces peuvent être distingués : l'Aulne, le Charme, le Chêne pédonculé et le Chêne rouge d'Amérique, à grand pouvoir solubilisant; le Hêtre, l'Epicéa, le Pin et le Sapin, peu actifs.

3° Au cours de leur décomposition les espèces du premier groupe perdent rapidement de leur activité, qui rejoint celle des Conifères et du Hêtre au bout de 5 mois de décomposition *in vitro*.

4° La différence de comportement de ces deux groupes d'espèces est due à la fois à leur teneur différente en substances facilement lessivables et à des différences dans les propriétés et la nature de ces substances. Quatre de ces propriétés ont un rôle particulier :

l'acidité des solutions,

le pouvoir réducteur,

le pouvoir complexant,

la richesse en polyphénols.

5° *L'acidité* des extraits semble jouer un rôle limitatif par son action directe dans la solubilisation du fer. De plus, elle intervient en favorisant la réduction à l'état ferreux de cet élément.

6° Une méthode d'étude du *pouvoir réducteur* des extraits a été mise au point. Ce dernier ne paraît être important qu'en milieux très acides. Cependant, il est encore appréciable aux concentrations en ions hydrogène rencontrées couramment dans les sols.

7° L'hypothèse de la migration du fer sous forme de *complexe colloïdal* a pu être vérifiée. Des mesures quantitatives et comparatives du pouvoir complexant des différentes litières ont montré que le fer nécessitait des quantités très faibles de matières organiques pour être maintenu en solution.

Fe^{++} est plus facilement complexé que Fe^{+++}.

8° La stabilité de ces complexes est fortement influencée par la richesse de la solution du sol en ions Ca^{++} libres. Plus la teneur en calcium est élevée, plus le fer nécessite de matière organique pour être maintenu en solution.

9° Parmi les substances chimiques susceptibles d'intervenir dans ces différents mécanismes de solubilisation et de transport du fer, les *polyphénols* jouent un rôle très important, à la fois comme agent solubilisant, réducteur et complexant.

10° Si la décomposition en milieu anaérobie favorise de façon certaine la mise en solution et le déplacement du fer, grâce à la synthèse de substances plus acides, plus réductrices et à pouvoir complexant plus marqué, elle ne constitue pas, comme certains auteurs le pensaient, une condition essentielle à la mobilisation du fer. En effet, tous les extraits étudiés, tant ceux des litières fraîches que ceux des litières décomposées, sont capables, aux pH rencontrés dans le sol, de réduire le fer et de le complexer.

SUMMARY

Investigations on the role of litter in the mobilization of iron lead to the following conclusions :

1. Fresh litters and their extracts are capable of dissolving greater or lesser amounts of iron both in a loam soil and in ferruginous sand.

2. The activity of iron mobilization varies with the kind of litter. Two groups of species may be distinguished : alder, hornbeam and oaks possess a high solubilizing power, while beech, spruce, pine and fir have low activities.

3. During decomposition, litter of the first group rapidly loses activity, decreasing to that of conifers after five-month decomposition *in vitro*.

4. Differences in the behaviour of these two groups of species are due to differences in the amounts, properties and nature of the easily soluble substances they contain. Four properties have a special role :

acidity of the solutions,
reducing power,
complexing capacity,
polyphenol contents.

5. *Acidity* of the extracts seems to play a limiting role by its direct action in dissolving iron. Furthermore, it promotes the reduction of the iron.

6. A method was developed for studying the *reducing power* of the extracts. The latter is only important in a highly acid environment, but may be quite considerable at pH levels generally occurring in soils.

7. The hypothesis on iron migrating in a *colloidal-complex* form was confirmed. Quantitative and comparative determinations of the complexing

capacity of different litters showed that iron requires very small amounts of organic matter to be maintained in solution. Complexing occurs more readily with Fe^{++} than with Fe^{+++}.

8. The stability of the complexes is greatly affected by the concentration of free Ca^{++} ions in the soil solution. The amounts of organic matter required for maintaining iron in solution increase with increasing concentrations of calcium.

9. *Polyphenols* play an important role as dissolving, reducing and complexing agents in the mechanism of dissolution and transport of iron.

10. While anaerobic decomposition promotes the dissolution and displacement of iron, due to the synthesis of substances which are highly acid and have great reducing and complexing power, it is not an essential condition for iron mobilization as claimed by certain authors. All the extracts investigated, whether from fresh litter or decomposed material, were capable of reducing and complexing iron at pH levels occurring in the soil.

ZUSAMMENFASSUNG

Die, in dieser Arbeit dargelegten Untersuchungen über die Eisenmobilisation durch Waldstreu, erlaubten nachstehende Schlussfolgerungen zu ziehen :

1. Die frische Streu und ihre Extrakte vermögen mehr oder minder grosse Eisenmengen aufzulösen, dies sowohl in einem Lehmboden als in einem eisenhaltigen Sand.

2. Diese Aktivität der Eisenmobilisierung ist verschieden je nach Art der Streu. Wir können zwei Artengruppen unterscheiden : Erle, Hainbuche, Stieleiche und amerikanische Roteiche mit grossem, Rotbuche, Rottanne, Kiefer und Tanne mit wenig aktivem Lösungsvermögen.

3. Die Arten der ersten Gruppe verlieren, im Laufe ihres Abbaues, sehr rasch ihre Aktivität ; dieselbe kommt innerhalb eines fünfmonatigen *in vitro* Abbaues derjenigen der Nadelhölzer gleich.

4. Das verschiedene Verhalten dieser beiden Artengruppen wird zugleich bedingt durch einen Gehaltsunterschied an leicht auslaugbaren Substanzen sowie durch einen Unterschied in den Eigenschaften und in der Zusammensetzung letzterer. Vier dieser Eigenschaften fällt eine besondere Rolle zu :

— der Säuregrad der Lösungen
— die Reduktionsfähigkeit
— das Komplexbildungsvermögen
— die Reichhaltigkeit an Polyphenolen

5. Durch seine direkte Einwirkung auf die Lösbarkeit des Eisens scheint der Säuregrad der Extrakte ein Grenzfaktor zu sein. Ferner greift er ein, indem er die Reduktion dieses Elementes in die Ferro-Form begünstigt.

6. Eine Untersuchungsmethode zur Bestimmung des Reduktionsvermögens der Extrakte wurde ausgearbeitet. Dasselbe scheint nur von Belang zu sein in sehr stark saurem Medium. Jedoch ist es noch beträchtlich für H-Ionenkonzentrationen welche geläufig in Böden vorkommen.

7. Die Hypothese einer Eisenwanderung unter kolloidaler Komplexform konnte bestätigt werden. Grösse-, sowie Vergleichsmessungen des Komplex-

bildungsvermögens verschiedener Streue zeigten, dass sehr geringe Mengen organischer Substanz nötig sind um das Eisen in Lösung zu erhalten.

Fe^{++} ist viel leichter komplexierbar als F^{+++}.

8. Die in der Bodenlösung freien Ca-Ionen beeinflussen sehr stark durch ihre Reichhaltigkeit, die Stabilität solcher Komplexe. Je höher der Gehalt an Kalzium, desto mehr organische Materie wird benötigt um das Eisen in Lösung zu halten.

9. Unter den chemischen Substanzen welche geeignet sind die verschiedenen Lösbarkeits-und Transportmechanismen des Eisens zu beeinflussen, spielen als Lösbarkeits-, Reduktions- und Komplexbildungsagenzen, die Polyphenole eine sehr wichtige Rolle.

10. Wenn auch die Substanzen, die während der anaéroben Zersetzung entstehen, saurer und reduktionsfähiger sind, und ein höheres Komplexbildungsvermögen besitzen, so ist dieser Umstand doch nicht wie es einige Autoren vertraten, eine wesentliche Bedingung zur Eisenmobilisation. Bei den in Böden angetroffenen pH-Werten sind nämlich alle untersuchten Extrakte, sei es solche aus frischer oder abgebauter Streu, fähig, das Eisen zu reduzieren und zu komplexieren.

Экспериментальное изучение влияния лесных покровов на мобилизацию почвенного железа.

Л. ЛОСЭН. (Ботанический Институт, Страсбург.)

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Из совокупности изучения роли, которую играет почвенный покров в мобилизации железа, изложенного в этой работе, можно вывести следующие заключения :

1. Покров свежий и его вытяжки способны растворять более или менее значительные количества железа, как в почве пылеватой (limon), так и в песке содержащем железо.

2. Эта мобилизирующая железо способность непостоянна, она зависит от природы покрова. Можно различать две группы пород : ольха, граб, летний дуб (Q. pedunculata) и красный американский дуб, имеющие большую растворяющую способность; бук, ель, сосна и пихта, со слабой способностью.

3. Разлагаясь, породы первой группы быстро теряют свою энергию, которая становится сходной с энергией хвойных по истечении пяти месяцев разложения in vitro.

4. Разница в поведении этих двух групп пород зависит одновременно от неодинакового в них содержания легкорастворимых веществ и от различий в свойствах и в природе этих веществ. В частности, играют роль четыре свойства :

кислотность растворов
восстановительная способность
способность образовывать комплексные соединения
богатство полифенолами.

5. *Кислотность* вытяжек играет повидимому решающую роль благодаря своему прямому действию в растворении железа. Сверх того, она участвует способствуя восстановлению этого элемента, который принимает двухвалентную форму.

6. Выработан метод изучения *восстановляющей способности* вытяжек. Эта способность становится значительной только в очень кислых средах. Все же, она довольно значительна при обычно встречающихся в почвах концентрациях ионов водорода.

7. Удалось проверить гипотезу миграции железа в форме *коллоидального комплекса*. Количественные и сравнительные определения комплексирующей способности различных покровов показали, что железо, чтобы оставаться в растворе, требовало очень незначительного количества органического вещества.

Двухвалентное железо более легко вступает в комплексные соединения чем трехвалентное.

8. Устойчивость этих комплексных соединений сильно зависит от содержания почвенного раствора в свободных ионах Ca^{++}. Чем выше содержание кальция, тем больше требуется органического вещества, чтобы железо оставалось в растворе.

9. Среди органических веществ способных участвовать в этих различных способах растворения и перенесения железа, очень важную роль играют *полифенолы,* одновременно в качестве растворителя, восстановителя и комплексатора.

10. Если разложение в анаэробной среде и способетвует несомненно растворению и передвижению железа благодаря образованию более кислых, сильнее восстанавливающих и имеющих более значительную комплексирующую способность веществ, оно не является, как это думали некоторые авторы, существенным условием мобилизации железа. В самом деле, все изученные вытяжки, как полученные из свежих покровов, так и из подвергнувшихся разложению, — все они способны, при pH встреченных в почвах, восстанавливать и комплексировать железо.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AALTONEN (V. T.). — Ueber den Einfluss der Holzart auf den Boden. *Comm. Inst. For. Fenniae,* **17,** (5), 1932, 1-88.

AARNIO (B.). — Experimentelle Untersuchungen zur Frage der Ausfällung des Eisens in Podzolböden. *Int. Mit. f. Bodenkunde,* **3**, 1913, 131-140.

ALBERT (A.). — Quantitative studies of the avidity of naturally occuring substances for trace metals. I. Amino-acids having only two ionizing groups, *Biochem. J.*, **47**, 1950, 531-538.

ALWAY (F. J.), ZON (R.). — Quantity and nutrient content of Pine leaf litter. *J. Forestry,* **28,** 715, 1930.

ALLISON (L. E.), SCARSETH (G. D.). — A biological reduction method of removing free iron oxides from soils and colloid clays. *J. Am. Soc. Agron.*, **34,** 1942, 616-623.

ANNE (P.). — Sur le dosage du carbone organique des sols. *Ann. Agr.*, **2,** 1945, 161.

ANSTETT (A.). — Adaptation de la méthode Schollenberger-Anne au dosage rapide du Carbone organique dans les fumiers et les végétaux. *Ann. Inst. Agric. Algérie,* **5,** 1950, 1-7.

ARISTOVSKAYA (T. V.). — The role of microorganisms in podzol process. *C. R. Congr. Int. Sc. du Sol,* Com. III, Paris, 1956, 263-269.

ATKINSON (H. J.), WRIGHT (J. R.). — Chelation and vertical movement of soil constituents. *Soil Science*, **84**, 1957.

BARBIER (G.). — Conditions et modalités de la fixation de l'hydrate ferrique colloïdal par l'argile des sols. *Ann. Agron.*, **8**, 1, 1938, 34-43.

BASTISSE (E. M.). — Rôle vecteur des divers anions minéraux et organiques dans les phénomènes géochimiques et physiologiques. *Ann. Agron.* 1945, 30-46.

BECKWITH (R. S.). — Metal complexis in soils. *Austr. J. Agr. Res.*, nº 6, 1955, 685-698.

BETREMIEUX (R). — Etude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse dans les sols. *Ann. Agron.* nº 3, 1951, 193-295.

BEZIER (D.). — Etude électrochimique de la stabilité de quelques complexes ferriques. *J. Chim. Phys.*, **41**, 1944, 125.

BEZIER (D.). — Étude électrochimique de l'ion ferrique et de quelques-uns de ses complexes. *Annales de Chimie*, **20**, 1945.

BLOOMFIELD (C.). — Some observations on gleying. *J. of Soil Science*, **1**, 2, 1950, 205-211.

BLOOMFIELD (C.). — Experiments on the mechanism of gley formation. *J. of Soil Science*, **2**, 2, 1951, 196-211.

BLOOMFIELD (C.). — Translocation of iron in podzol formation. *Nature* (G. B.), **170**, 1952, 540.

BLOOMFIELD (C.). — A study of podzolization.
Part. I. *J. of Soil Science*, **4**, 1, 1953, 5-16. —
Part II. *J. of Soil Science*, **4**, 1, 1953, 17-23. —
Part. III. *J. of Soil Science*, **5**, 1, 1954, 39-45. —
Part. IV. *J. of Soil Science*, **5**, 1, 1954, 46-49. —
Part. V. *J. of Soil Science*, **5**, 1, 1954, 50-56. —

BLOOMFIELD (C.). — Leaf leachates as a factor in pedogenesis. *J. Sci. Food Agric.*, **6**, 11, 1955, 641-651.

BLOOMFIELD (C.). — The possible significance of polyphenols in soil formation. *J. Sc. Food Agric.*, nº 7, 1957, 389-392.

BLOOMFIELD (C.). — The solution-reduction of ferric oxyde by aqueous leaf extracts. The role of certain constituents of the extracts. *C. R.* 6e *Congr. Int. Sc. du Sol.* Comm. 2, Paris, 1956.

BLOOMFIELD (C.). — The defloculation of Kaolinite by aqueous leaf extracts. The role of certain constituents of the extracts. *C. R.* 6e *Congr. Int. Sc. du Sol*, Comm. 1, Paris, 1956.

BOERNER (H.). — Untersuchungen über phenolische Verbindungen aus Getreidestroh und Getreiderückständen. *Die Naturwissenschaften*, **42**, 1955, 583-584.

BREMNER (J. M.), HEINTZE (S. G.). — Metallo-organic complexes in soil. *Nature* (G. B.), **158**, 1946, 790-791.

BREMNER (J. M.). — A review of recent work on soil organic matter. Part I., *J. of Soil Science*, **2**, 1, 1951, 67-82.
Part II. *J. of Soil Science*, **5**, 2, 1954, 214-232.

BRITTON (H. T. S.), JARRET (M. E. D.). — Physico-chemical studies on complex formation involving weak acids. *J. Chem. Soc.*, **137**, 1728, 1935.

BROADBENT (F. E.), OTT (J. B.). — Organic matter-metal complexis. *Soil Science*, **83**, 6, 1957, 419-427.

BROADFOOT (W. M.), PIERRE (W. H.). — Forest soil studies. I. Relation of rate of decomposition of tree leaves to their acid-base balance and other chemical properties. *Soil. Sc.*, **48**, 1939, 329-348.

BROWN (J. C.). — Iron Chlorosis. *Ann. Review of Plant Physiol.*, **7**, 1956, 171-190.

BRUNEL (A.). — Traité pratique de Chimie Végétale. Tourcoing, 4 vol., 1948.

BURGES (A.). — The release of cations during the decomposition of forest litter. *C. R.* 6e *Congr. Int. Sc. du Sol*, Comm. II, Paris, 1956.

CHANDLER (R. F.). — Amount and nutrient content of freshly fallen hardwoop litter in the hardwood forests of central New York. *J. Amer. Soc. Agron.*, **33,** 1941, 859-871.

CHARLOT (G.), BEZIER (D.). — Méthodes modernes d'analyse quantitative minérale, 3e éd. Masson et Cie, Paris, 1949.

Chilean Nitrate educational Bureau, Inc. Bibliography of the literature on the minor elements, New-York 1948.

COILE (T. S.). — Composition of the leaf litter of forest trees. *Soil Science,* **43,** 1937, 349-355.

COLDWELL (B. B.), DELONG (W. A.). — Studies of the composition of deciduous forest tree leaves before and after partial decomposition. *Scientific Agric.*, **30,** 1950, 456-466.

COMBES (R.). — Etude de la migration automnale des substances azotées chez le Chêne par l'analyse des plantes entières. *C. R. Ac. Sciences,* **182,** 1926, 984.

COMBES (R.). — La migration des substances azotées chez le Hêtre au cours du jaunissement automnal. — *Id.*, **182,** 1926, 1169.

COMBES (R.) et ECHEVIN (R.). — Variation des matières organiques et minérales et en particulier du Ca dans les feuilles des arbres au cours du jaunissement automnal. *Id.*, **182,** 1926, p. 1557.

DAUBENMIRE (R.). — Nutrient content of leaf litter of trees in the Northern Rocky Moutains. *Ecology,* **34,** 4, 1953, 786-793.

DEB (B. C.). — The movement and precipitation of iron oxides in podzol soils. *J. of Soil Science,* **1,** 1, 1949, 112-122.

DEB (B. C.). — The estimation of free iron oxides in soils and clay and their removal. *J. of Soil Science,* **1,** 2, 1950, 212-220.

DELONG (W. A.), SCHNITZER (M.). — Investigations on the mobilization and transport of iron in forested soils. I. The capacities of leaf extracts and leachates, to react with iron. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **19,** 1955, 360-363.

DEMOLON (A.), LEROUX (D.). — Guide pour l'étude expérimentale du sol. Paris, 1933.

DEMOLON (A.) et BASTISSE (E. M.). — Sur quelques complexes colloïdaux du fer et de l'aluminium. *Ann. Agron.* nº 1, 1938, 6-33.

DEMOLON (A.) et BASTISSE (E. M.). — Rôle vecteur de la silice dans les phénomènes géochimiques et physiologiques. *Ann. Agron.*, **14,** 1944, 265-297.

DEMOLON (A.). — Dynamique du sol, Dunod, Paris, 1952.

DUCHAUFOUR (Ph.). — Ralentissement de l'évolution des podzols par la présence d'espèces à feuilles riches en CaO. *C. R. Ac. Sci.*, **222,** 1946, 902.

DUCHAUFOUR (Ph.). — Recherches écologiques sur la Chênaie atlantique française. Thèse Montpellier, 1948, 332 p.

DUCHAUFOUR (Ph.). — Humus actif et Humus inerte. *Ann. Ec. Nat. des Eaux et Forêts,* **13,** 2, 1953, 400-454.

DUCHAUFOUR (Ph.). MICHAUD (R.), MILLOT (G.). — Etude des éléments fins de quelques types de sols de climat atlantique. *Géol. Appl. et Prosp. Minière,* **3,** 4, 1950, 31-62.

DUCHAUFOUR (Ph.). — Note sur la solubilité du fer par la matière organique. *Bull. A. F. E. S.*, nº 46, 1953, 7-13.

DUCHAUFOUR (Ph.). — Lessivage et podzolisation. *Rev. forest. franç.*, nº 10, 1951, 647-652.

DUCHAUFOUR (Ph.). — Pédologie. Applications agricoles et forestières. École Nationale des Eaux et Forêts, Nancy, 1956, 310 p.

DUCHAUFOUR (Ph.). — L'action des divers types d'humus sur les processus d'entraînement dans le sol forestier. *Rev. Forest. Franç.*, nº 12, 1957, 887-897.

DUCHAUFOUR (Ph.). — Sur le rôle de la matière organique dans les phénomènes de lessivage et de podzolisation. *C. R. Ac. Sci.*, **245,** 1957, 1154-1157.

DUFRENOY (J.). — Les agents de chélation et leurs usages agricoles. *J. Agric. Trop. Bot. Appl.*, **1**, 1954, 482-486.

EBERMAYER (E.). — Die gesammte Lehre der Waldstreu. Julius Springer, Berlin, 1876, 116 p.

FALCONER (J. C.), WRIGHT (J. W.), BEALL (H. W.). — The decomposition of certain types of forest litter under field conditions. *Am. J. of Botany*, **20**, 1933, 196-320.

FELFOLDY (L.). — Calcium content of foliage of forest trees. *Agrokemia ès Taljtan*, **1**, 1, 1951, 77-84.

FLAIG (W.), SCHARRER (K.), JUDEL (G. K.). — Zur Methodik der Bestimmung des Redoxpotentials im Boden. *Zeitschr. für. Pflanz., Düng. u. Bodenk.*, **68** (113), 1955, 97-122.

FLAIG (W.), SCHARRER (K.), JUDEL (G. K.). — Bestimmung des Redoxpotentials von Bodenprofilen. *Id.*, **68**, 1955, 206-218.

FRANC DE FERRIÈRE (J.). — Pédologie et Géologie, Strasbourg, 1937, 155 p.

FROMENT (D.). — Quelques résultats au sujet du pH et du pouvoir tampon de la fane de différentes essences forestières. *Bull. Inst. Agron. Gembloux*, **22**, 1954, 287-289.

GALLAGHER (P. H.). — The mobile colloïdal humus of podzolic soils and its relationship to the process of podzolization. *Proc. Royal Irish Academy*, **48**B, 1942, 213-229.

GARKUSCHA (J. F.). — Bodenkunde. Deutscher Bauernverlag, Berlin, 1953, 415 p.

GUSTAFSON (F. F.). — Decomposition of the leaves of some forest trees under field conditions. *Plant Physiol.*, **18**, 1943, 704-707.

HANDLEY (W. R. C.). — Mull and Mor formation in relation to forest soils. *Forestry Commission, Bull*, nº 23, London, 1954, 116 p.

HILL-COTTINGHAM (D. G.), LLOYD-JONES (C. P.). — Laboratory experiments with Fe-EDTA and Fe-HEEDTA. *Plant and Soil*, **8**, 1957, 263-274.

HENIN (S.), BETREMIEUX (R.). — Essai de pédologie expérimentale. *C. R*, 4e *Congr. Int. Sc. du Sol.*, vol. **1**, 1950.

HORNER (C. K.), DEAN (B.), HOOVER (S. R.). — Preparation of humate iron and other humate metals. *Plant Phys.*, **9**, 1934, 663-669.

LARKOV (S. P.). — La formation des sols podzoliques. *C. R*, 5e *Congr. Int. Sc. du Sol*, Léopoldville, 1954.

LARKOV (S. P.). — Dynamique saisonnière de certains processus dans les sols. *C. R.* 6e *Congr. Int. Sc. du Sol*, Paris, 1956.

IGNIATIEFF (V.). — Determination and behaviour of ferrous iron in soils. *Soil Science*, **51**, 1941, 249-263.

JENNY (H.). — Factors of soil formation. McGraw Hill, New-York, 1941, 270 p.

JENNY (H.), GESSEL (S. P.), BINGHAM (T.). — Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions. *Soil Science*, **68**, 419, 1949.

JOFFE (J. S.). — Soil profile studies : IV, Morphological and chemical evidence of podzolization. *Soil Science*, **33**, 1932, 217-238.

JOFFE (J. S.). — Pedology, 2e Ed., New Brunswick, 1949, 575 p.

JOHNSTON (R. R.). — A laboratory study of the decomposition of vegetable debris in relation to the formation or raw humus. *Plant and Soil*, **VI**, 4, 1953, 334-361.

KRAUSS (G.). — Uber Schwankungen des Kalkgehalts im Rotbuchenlaub auf verschiedenen Standorten. *Forstwiss.* Centralbl., **48**, 1926.

LAATSCH (W.). — Die Gerbsäure-Zerstörung nasser Eichenwaldböden. *Forstwiss. Centralbl.*, **59**, 1937, 237-247.

LAFOND (A.). — Oxidation-reduction potential as a characteristic of forest humus types. *Soil Sc. Amer. Proc.*, **14**, 1949, p. 337.

LAMBERTS (D.), LIVENS (P. J.). — L'accumulation d'oxydes de fer dans les sols sur limon lœssique. *C. R. Congr. Int. Sc. du Sol*, Léopoldville, 1954, 478-485.

LANGE (B.). — Kolorimetrische Analyse, Berlin, 1941, 446 p.

LAUDELOUT (H.) et MEYER (J.). — Les cycles d'éléments minéraux et de matière organique en forêt équatoriale congolaise. *C. R.* 5e *Congr. Int. Sc. du Sol*, Léopoldville, vol. II, 1954, 267-271.

LEIBUNDGUT (H.). — Beobachtungen über den Streuabbau einiger Baumarten. *Schweiz. Ztschr. f. Forstwesen*, **104**, 1953, 17-192.

LEMÉE (G.), LOSSAINT (P.). — Notice explicative de la carte des groupements végétaux et des sols du massif forestier du Herrenwald, Krittwald et bois de Geudertheim. *C. N. R. S., Serv. de la Carte des Groupements végétaux*, Montpellier, 1953, 5 p.

LEMÉE (G.), LOSSAINT (P.), METTAUER (H.), WEISSBECKER (R.). — Recherches préliminaires sur les caractères biochimiques de l'humus dans quelques groupements forestiers de la plaine d'Alsace. *Ber. über das Int. Symp. Pflanzensoz.-Bodenkunde*, 1956; *Angewandte Pflanzensoziologie*, **15**, Stolzenau/Weser, 1958, 93-101.

LILLY et BARNETT. — Physiology of the Fungi, MacGraw-Hill Co. Inc. New-York, 1951, 464 p.

LIVENS (J.), VANSTALLEN (R.). — Recherches sur le rôle de la litière dans la désaturation en bases des sols forestiers sur limon lœssique. *Agricultura*, **4**, 2e sér., 2, 1956, 113-132.

LIVENS (J.), VANSTALLEN (R.). — Extraits aqueux de litières en décomposition ; leur réaction et leur teneur en bases. *Agricultura*, **5**, 2e sér., 1, 1957, 99-119.

LOSSAINT (P.). — Influence de la végétation forestière et de la culture sur l'évolution des sols sableux aux environs de Strasbourg. *Ann. Agron.*, nº 6, 1951, 803-817.

LOSSAINT (P.). — Influence de la composition chimique de litières forestières sur leur vitesse de décomposition. *C. R. Ac. des Sciences*, **236**, 1953, 522-524.

LOSSAINT (P.). — Solubilisation du fer dans un sol par les extraits aqueux de litière de Charme et de Pin silvestre. *Id.* **239**, 1954, 187-189.

LOSSAINT (P.). — Étude comparative de la solubilisation des oxydes de fer d'un sol par les extraits stériles de litières forestières. *Id.* **242**, 1956, 1052-1054.

LOSSAINT (P.). — Sur le pouvoir réducteur des extraits de quelques litières forestières. Litières non décomposées. *Id.* **245**, 1957, 2091-2093.

LOSSAINT (P.). — Sur le pouvoir complexant vis-à-vis du fer ferrique et du fer ferreux des extraits de quelques litières forestières fraîches et décomposées. *Id.* **247**, 1958, 106-109.

LUTWICK (L. E.), DELONG (W. A.). — Leachates from decomposing leaves. I. Some general characteristics. *Scient. Agricult.*, **32**, 11, 1952, 603-613. II. Interaction with soil forming materials. *Can. J. of Agric. Science*, **34**, 1954, 203-213.

LUTZ (H. G.), CHANDLER (R. F.). — Forest Soils. Chapman and Hall, London, 1949, 510 p.

MACLEAN (K. D.), DELONG (W. A.). — On the carbohydrate component in leaf extracts and in leachates obtained under forest canopy. *Can. J. of Agric. Science*, **36**, 1956, 267-275.

MANDL (I.), GRAUER (A.), NEUBERG (C.). — Solubilization of insoluble matter in nature. II. The part played by salts of organic and inorganic acids occuring in nature. *Biochem. et Biophys. Acta*, **10**, 1953, 540-569.

MARTELL (A. E.), CALVIN (M.). — Chemistry of the metal chelate compounds. Prentice-Hall Inc., New-York, 1952, 613 p.

MARTEN (E. A.), POHLMAN (G. G.). — Forest soil studies. II. Changes in microflora and chemical composition of decomposing tree leaves. *Soil Science*, **52**, 1942, 67-77.

MARTIN (A. E.), REEVE (R.). — Chemical studies on podzolic illuvial horizons. I. Extraction of organic matter by organic chelating agents. *J. of Soil. Sci.*, **8**, 2, 1957, 268-278.
II. The use of acetylacetone as extractor of translocated organic-matter suspensions. *Id.* 279-286.
III. Titration curves of organic-matter suspensions. *Id.* **9**, 1958, 89-100.

MATTSON (S.). — The laws of soil colloïdal behaviour. III et IV. Isoelectric precipitates. *Soil Science*, **30**, 1930 ; **31**, 1931.

MATTSON (S.), KOUTLER-ANDERSSON (E.). — The acid-base condition in vegetation, litter and humus. I. Acids, acidoïds and bases in relation to decomposition. *Lantbr. Högsk. Ann.*, **9**, 1, 1941 *a*.
II. Acids, acidoïds and bases in relation to soil types. *Id.*, **9**, 27, 1941 *b*.
VIII. Forms of acidity. *Id.* **12**, 70, 1944.
XI. Acid and base in decomposing litter. *Id.* **21**, 1954, 389-400.

METTAUER (H.). — 1957 (non publié).

MEUNIER (L.), VANEY (C.). — La Tannerie. Gauthiers-Villars, Paris, 1936, 804 p.

MIKOLA (P.), HINTIKKO (V.). — The development of a microbial population in decomposing forest litter. A laboratory study. *Comm. Inst. Forest Fennicae*, **46** (5), 1956, 1-115.

MOLLIARD (M.). — Sur une nouvelle fermentation acide produite par le *Sterigmatocystis nigra*. *C. R. Ac. Sci.*, **174**, 1922, 881-883.

MULLER (P. E.). — Studien über die natürlichen Humusformen. Springer, Berlin, 1887, 324 p.

OLSON. — Iron solubility in soils as affected by pH and free iron oxide content. *Soil Sc. Soc. Am. Proc.*, **12**, 1947, 153-157.

OVINGTON (J. D.). — Studies of the development of woodland conditions under different trees.
I. Soils pH. *J. Ecol.*, **43**, 1953, 13-34.
IV. The ignition loss, water, carbon and nitrogen content. *Id.* **44**, 1956.
V. The mineral composition of the ground flora. *Id.* **44**, 1956.
VI. Soil Calcium and Magnesium. *Id.* **46**, 1958.

OVINGTON (J. D.). — The ecological conditions of different woodland types. *Proc. Linnean Soc. London*, Session 165, 1955, 103-105.

OVINGTON (J. D.). — The composition of tree leaves. *Forestry*, **29**, 1956.

PLAISANCE (G.). — Bibliographie des sols de France. *Ann. du Centre d'études et de documentation paléontologiques*, nº 21, 1957, 244 p.

PLICE (M. J.). — Acidity, antacid buffering and nutrient content of forest litter in relation to humus and soil. *Cornell Univ. Agric. Exp. Stat. Mem.*, **166**, 1934, 32 p.

POCHON (J.), BARJAC (H. de). — Traité de microbiologie des sols. Dunod Paris, 1958, 685 p.

PRINGSHEIM (E. G.). — Organismes ferrugineux. *Endeavour*, **11**, 44, 1952, 208-214.

REIFENBERG (A.). — Ueber die Rolle der Kieselsäure als Schutzkolloïd bei der Entstehung mediterraner Roterde. *Z. f. Pflanzenern., Düng. u. Bodenk.*, **10**, 1927, 159-186.

RICHARD (F.). — Der biologische Abbau von Zellulose und Eiweisstestschnüren im Boden von Wald und Rasengesellschaften. *Mitt. d. schweiz. Anst. f. d. forstliche Versuchswesen*, **24**, 1, 1945, 297-395.

ROMELL (L. G.). — Mull and Duff as biotic equilibria. *Soil Science*, **34**, 1932, 161-188.

ROBERTS (J. L.). — *Soil Science*, **63**, 1947, 135-140 (in BETREMIEUX, 1951).

SCHATZ (A.), CHERONIS (N. D.), SCHATZ (V.), TRELAWAY (G. S.). — Chelation (sequestration) as a biological weathering factor in pedogenesis. *Proc. of Pennsylvania Ac. of Science,* **28,** 1954, 44-51.

SCHEFFER (F.), ULRICH (B.), HIESTERMANN (P.). — Die Bedeutung der Chelatisierung in der Agrikulturchemie und Bodenkunde. *Z. f. Pflanzenern., Düng, u. Bodenkunde,* 76 (121), 1957, 146-155.

SCHEFFER (F.), ULRICH (B.), HIESTERMANN (P.). — Ein methodischer Weg zur Ermittlung der Komplex-und Chelatbindungskapazität von organischen Stoffen und Böden. *Z. für Pflanzenern., Düng. u. Bodenkunde,* **78** (123), 1957, 168-177.

SCHNITZER (M.), DELONG (W. A.). — A note on the podzolization process. *Sci. Agricult.,* **32,** 12, 1952, 680-681.

SCHNITZER (M.), DELONG (W. A.). — Note on the reaction of 2, 2-dipyridyl with iron in presence of organic matter. *Can. J. of Agric. Science,* **34,** 3, 1954, 324-325.

SCHNITZER (M.), DELONG (W. A.). — Note on relative capacities of solutions obtained from forest vegetation for mobilization of iron. *Can. J. Agric. Science,* **34,** 5, 1954, 542-543.

SCHNITZER (M.), DELONG (W. A.). — Investigation on the mobilization and transport of iron in forested soils. II. The nature of the reaction of leaf extracts and leachates with iron. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.,* **19,** 3, 1955, 363-368.

STARKEY (R. L.), HALVORSON (H. O.). — *Soil Science,* **24,** 1927, 381-401 (in BETREMIEUX, 1951).

STEPANOV (N. N.). — Die Zersetzung des Laubabfalles der Bäume und Sträucher. *Proc. 2d Int. Congr. Soil Science,* **5,** 1932, 300-305.

STRUTHERS (P. H.), SIELING (D. H.). — Replacement of phosphates by anions. *Soil Science,* **69,** 1950.

SWINDALE (L. D.), JACKSON (M. L.). — Genetic processes in some residual podzolized soils of New Zealand. *Congr. Int. Science du Sol,* Paris, vol E, 1956, 233-239.

THORP (J.), STRONG (L. E.), GAMBLE (E.). — Experiments in soil genesis. The role of leaching. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.,* **21,** 1957, 99-102.

VESSEREAU (A.). — Méthodes statistiques en biologie et en agronomie. Paris, 1948, 381 p.

WAKSMAN (S. A.), TENNEY (F. G.). — The composition of natural organic materials and their decomposition in the soil. I. Methods of quantitative analysis of plant materials. *Soil Science,* **24,** 1927, 275-283.

WAKSMAN (S. A.). — Humus, Origin, chemical composition and importance in nature. Baillère, Tindall et Cox ; London, 1938, 528 p.

WAKSMAN (S. A.). — Soil microbiology. J. Wiley & Sons, New York, 1952, 356 p.

WITTICH (W.). — Untersuchungen über den Einfluss der Holzart auf den biologischen Zustand des Bodens. *Z. f. Forst-u. Jagdwesen,* **66,** 1934, 213-218.

WITTICH (W.). — Untersuchungen über den Verlauf der Streuzersetzung auf einem Boden mit Mullzustand. *Forstarchiv,* **15,** 1939, 96.

WITTICH (W.). — II. *id.,* **19,** 1943, 1-18.

WITTICH (W.). — IV. *id.,* **20,** 1944.

WITTICH (W.). — Der heutige Stand unseres Wissens vom Humus und neue Wege zur Lösung des Rohhumusproblems im Walde. *Schriftenreihe der Forstl. Fak. Univ. Göttingen,* **4,** 1952, 106 p.

631. 482. 1.

LES SOLS ALLUVIAUX MARITIMES MER DU NORD — MANCHE — OCÉAN ATLANTIQUE

PAR

C. E. RIEDEL

Maître de Conférences à l'Institut National Agronomique, (Paris).

PLAN DU MÉMOIRE

INTRODUCTION

PREMIÈRE PARTIE

Géographie des dépôts étudiés.

Pédogénèse :

A. — Étude des alluviaux maritimes et des conditions de leur formation à partir des vases marines.

B. — Stades d'évolution des alluviaux maritimes selon les sites étudiés et rattachement à leur catégorie dans la systématique des sols. Leur composition physique et chimique.

C. — Caractères agricoles des sols issus d'alluviaux maritimes.

DEUXIÈME PARTIE

Pédologie :

A. — Rôles respectifs du climat, du relief, de la roche-mère, de la végétation, de l'homme dans le comportement actuel des alluviaux maritimes aux divers stades.

B. — Potentiel des sols alluviaux maritimes.
Esquisse de leur potentiel de fertilité.
I. — Potentiel physique.
II. — Potentiel chimique.
III. — Potentiel biologique.
IV. — Conclusion.

TROISIÈME PARTIE

Agronomie : Méthode de mise en valeur des alluviaux maritimes.

A. — 1re étape, au stade naissant :
Création des « Koog » le long de la côte frisonne.
Site I, Allemagne occidentale (Slesvig et Frise du Nord).
Site II, Pays-Bas. Frise.

B. — 2e étape, au stade mor sur mull calcique :
Exploitation d'un climat amélioré.
Site III, Marais de Rochefort (Aunis) Charente-Maritime.

C. — 3e étape, au stade sol mixte résultant de l'homogénéisation récente d'un mor sur mull calcique.
Exploitation d'un milieu transformé par les améliorations foncières et la culture.
Site IV, Marais de Saint-Augustin (Saintonge), Charente-Maritime.

D. — Conclusion.

Conclusion.

Productivité comparée des trois méthodes.

INTRODUCTION

Le littoral de l'Europe est souvent sans relief : lorsqu'il s'étend au voisinage de fleuves actifs susceptibles de rouler vers la mer des alluvions saisonnières, il s'encombre, depuis des millénaires, de vases marines d'origine cependant fluviale.

Depuis 1953, diverses missions ou voyages d'études nous ont amenés dans le voisinage de la frontière danoise (Marschen), de l'embouchure de l'Ems (en Frise occidentale allemande), de la Gironde (en marais de Rochefort et de Saint-Augustin) et dans les marais poitevins. Un lien nous est apparu entre ces sites dispersés sous des climats différents qui pouvait, à la fois, nous éclairer sur l'origine des vases, le processus naturel ou accéléré de leur dépôt et de leur évolution pédologique : au fur et à mesure de nos périgrinations, nous apparaissaient les mêmes alluviaux maritimes issus de mers semblables quant à la teneur en sels, 35 à 36 p. 1000 (1) mais soumis à l'influence de milieux climatiques différents.

Ces alluviaux se trouvent aujourd'hui à des degrés d'évolution différents, naissants si l'action du climat s'est trouvée continuellement contrecarrée par les travaux des hommes (Frise), déjà dégradés par les tourbières ou mor si l'homme, après quelques travaux d'assainissement, au XVIIe siècle, les a abandonnés à l'action du climat (Aunis.)

Comment ces mornes sites peuvent-ils être repris, au prix de quels investissements et de quelle patience, étant donnée la texture dégradée

(1) Traité de Géographie physique par Emm. de MARTONNE. Tome 1er, p. 352, 1925. 4e édition Armand Colin.

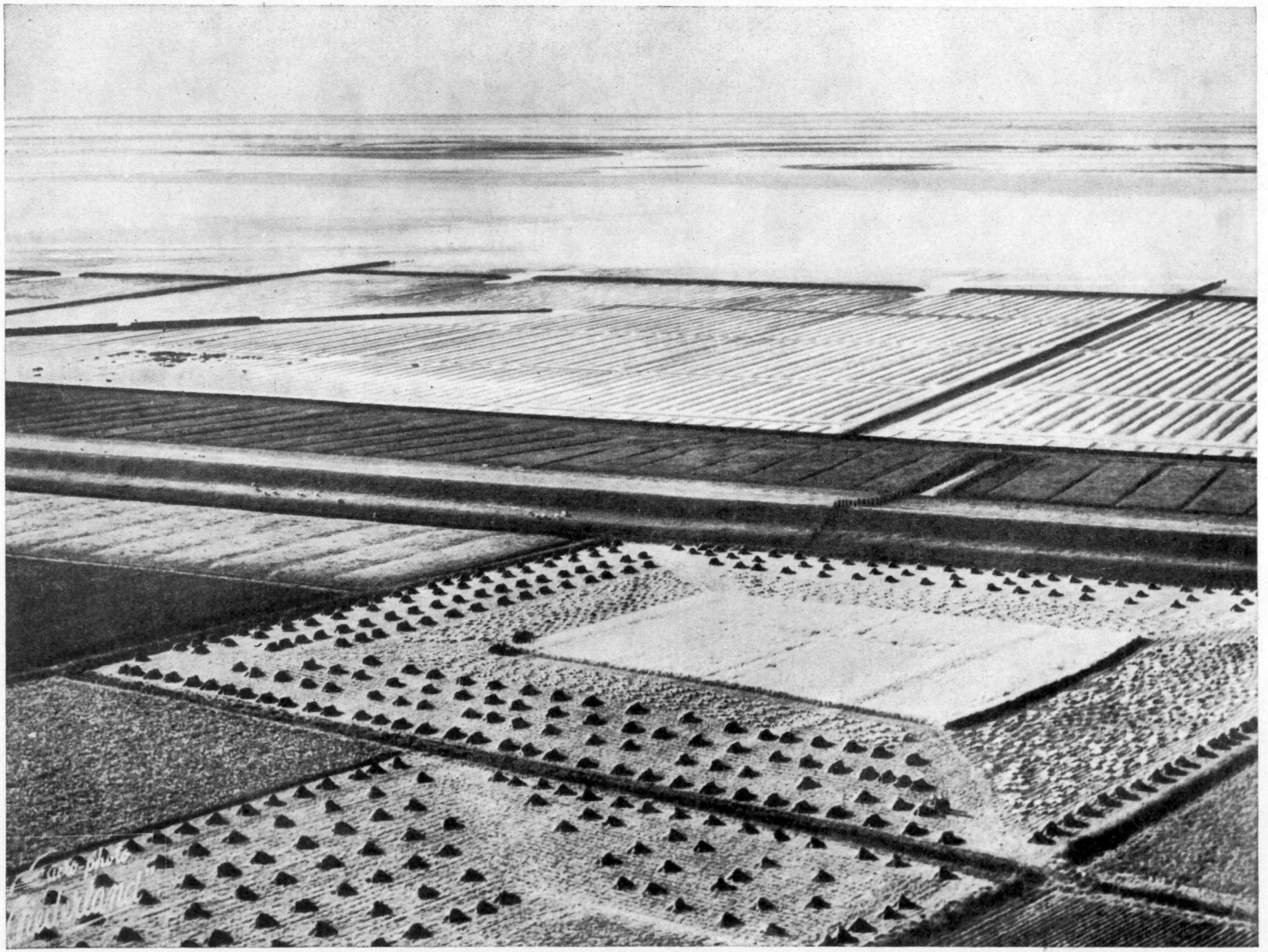


Fig. 1. — En Frise : Alluviaux marins récemment piégés et mis en culture après édification de la digue de protection D.
Au delà de la digue, procèdés de piègeage en action pluriannelle (marée basse)

du milieu et la difficulté d'y créer une structure favorable (cas de l'Aunis) sous la menace continue du retour des eaux en hiver?

Chaque riverain doit-il poursuivre seul ses expériences de mise en valeur ou peut-il tirer parti de celles, parfois chèrement acquises, d'autres riverains placés sous des climats peu différents?

En réalité, la technique de mise en valeur des alluviaux est très avancée en Europe, mais les frontières, les idiomes et même en France, les désignations locales, ont considérablement retardé l'adoption de la bonne méthode culturale.

En donnant à ces sols l'appelation d'origine « alluviaux maritimes », en indiquant le stade d'évolution pédologique où ils se trouvent dans les sites climatiques étudiés, notre désir est de fournir enfin cette clef, ce dénominateur commun à tous les exploitants européens de « slikke », de « schorre », de « marais », de « molières », de « bas-champs », de « bris » ou de « palus ».

En reprenant à leur profit sur leur marais parvenu à un certain degré d'évolution, les méthodes éprouvées correspondant à ce degré, ils réussiront rapidement à mettre leurs terres en meilleur état physique, celui qu'exige toute culture productive.

Enfin, nous verrons au prix de quels investissements s'y obtient cette productivité.

Ces quelques pages intéressent, en conséquence, les riverains européens de la Frise, de la Flandre maritime, du Marquenterre, de la baie de la Seine, de la baie du Mont-Saint-Michel, de la baie de Loire, des marais breton et poitevin, d'Aunis et de Saintonge, de l'embouchure de la Gironde enfin, à qui nous les dédions.

C. E. R.

PREMIÈRE PARTIE

GÉOGRAPHIE

Les sites étudiés et illustrés dans cette étude s'étagent du nord au sud de l'Europe :

Site I — Allemagne occidentale (Nordfriesland, entre la frontière danoise et l'embouchure de l'Elbe).

Site II — Allemagne occidentale (Ostfriesland au nord de l'embouchure de l'Ems (frontière hollandaise).

Site III — Près de l'embouchure de la Charente (Aunis) — Marais dit de Rochefort.

Site IV — Entre la baie de la Gironde et l'embouchure de la Seudre en Saintonge — Marais dit de Saint-Augustin.

Les analyses physiques et chimiques des horizons de ces sites donnent les chiffres suivants :

TABLEAU D'ANALYSES.

	Site I	Site II	Sites en friches ou travaillés de sites comparables à III et IV					
			Marais de Genouillé (1) (Charente-Maritime) (1)	(2)	Marais (2) de Saint-Hippolyte (Ch. Mar.)	Marais (3) Marennes	Marais (3) Tonnay-Charente (friche)	
	Schorre du Koog du Wieding-Harde (frise allemande)	Schorre des Pays-Bas (frise)						
		de o à 0,25 m	de o à 0,15 m	de 0,15 à 0,40 m	de o à 0,15 m	de o à 0,15 m	de o à 0,15	de 0,15 à 0,40 m
a) Analyse physique %								
Sable grossier	26,5 — 36,5	36,5	0,6	0,1	0,80	28,03	17,13	14,33
Sable fin			5,2	12,5	5,00			
Limon	60 à 70	45	32,3	28,2	35,10	31,2	32,3	28,2
Argile			46,4	56,4	50,20	45,5	46,4	56,4
Calcaire		12	1,3	1,0	0;00	1,28	1,33	0,97
Humus soluble	3,5	6,5	14,2	1,9	1,30	1,59	2,84	0,10
b) Anal. chimique de la terre fine ‰								
Réaction	alcaline	alcaline	acide	alcaline	acide	acide	acide	alcaline
pH(H_2O)	7,7	7,5 (Kcl)	6,0	7,4	6,50	6,7	6,0	7,4
Azote total	7,5		6,5	1,0	2,30	6,2	6,48	1,03
P_2O_5 total			—	—	1,16			
P_2O_5 assimil.	o		0,17	0,22	0,06	0,22	0,17	0,22
K_2O total			—	—	4,70			
K_2O assimil.			1,14	2,22	0,50	0,86	0,60	1,00
Chlore Cl			1,06	1,84	—	0,42	1,06	1,84
Fer Fe	2,7 à 3,1 (Fe_2O_3)							
Mg (magnésie échang.)			1,41			2,44	2,35	2,26
$\frac{Na}{Cl} = \frac{23}{35,5} = 0,66$ dans Na Cl			1,075 (4)			2,34	1,14	2,22
Sulfates (S)			0,44					
Na (sodium)			1,14					

(1) (3) Analyses de M. HURIEZ, Directeur de la Station Agronomique de Nantes.

(2) Analyses de MM. H. VERDIÉ, G. SILORET et J. FRANC DE FERRIÈRE. *Remarque* : Il s'agit d'analyses déjà anciennes où l'horizon de mor n'a pas été séparé du substratum et analysé après mélange avec les horizons sous-jacents.

(4) M. HURIEZ fait remarquer que, le rapport du sodium au chlore étant plus élevé dans le bri que dans le sel marin, une partie importante du chlore s'est éliminée, tandis que le sodium s'est fixé au complexe argilo-humique, rendant ses qualités physiques plus mauvaises : il est ici de 1,075 à 2,34 au lieu de 0,66 dans le sel marin.

PÉDOGÉNÈSE

A. — ÉTUDE DES ALLUVIAUX MARITIMES ET DES CONDITIONS DE LEUR FORMATION A PARTIR DES VASES MARINES :

Ces alluviaux enregistrés sur la carte géologique sous la lettre a^{2b} et la dénomination *alluvions marines* se retrouvent avec la même désignation locale sous alluvions fluviatiles : ils appartiennent à une formation ininterrompue d'origine fluvio-marine, tandis que leur bassin de réception continue à s'affaisser lentement (A. CAYEUX 1).

Voyons d'abord la définition avancée par les géologues pour les sols des sites 3 et 4, puis le processus de dépôt de ces vases comme l'évolution physique, chimique et biologique qu'elles ont subies entre le moment où leur voile s'est déposé et celui où elles ont commencé à échapper à l'emprise du flux.

I. — Définition.

a^{2b} *Alluvions marines* : (bri) des marais de la Basse Seudre et de la Gironde souvent associées à des alluvions fluviatiles et à des tourbes. Leur cote supérieure ne dépasse pas 2 à 3 mètres au-dessus du niveau moyen de la mer : leur épaisseur peut atteindre 35 m.

Ce sont des vases bleu foncé à l'état humide, grisâtres à sec, à coquilles marines analogues à celles qui vivent actuellement sur la côte.

Sur les bords de la Gironde, elles portent des pâtures et quelques cultures (palus).

a^{2a} *Alluvions fluviatiles* : (bri). Elles passent par toutes les transitions aux alluvions marines a^{2b}. Sur la rive droite de la Gironde, elle les recouvre plus ou moins. Elles contiennent souvent des lits de tourbe : à Saintes, un forage a traversé 25 m de tourbe sous deux mètres seulement de bri.

Partout, bri et tourbe comblent, sous les vallées actuelles, un sillon creusé ou approfondi lors de la régression préflandrienne, profond en aval de 20 à 30 m.

Le matériel du bri provient pour une large part de l'érosion des sols des bassins versants, consécutive à la déforestation, depuis le Néolithique : à Saintes, un habitat romain a été recouvert par 1,8 m de bri. Ailleurs, en surface du sol, des silex et haches néolithiques ont été trouvés ».

Si, maintenant, nous jetons un coup d'œil sur la carte des côtes de la Mer du Nord, en Allemagne occidentale et aux Pays-Bas, nous remarquons que ces dépôts continuent, comme le montre aussi la fig. 2 prise

(1) A. CAYEUX. — Variation du niveau des mers et des terres. Bulletin de la Société Géologique de France — 6e série, tome II, année 1952.

au contact même du gisement déjà fixé dénommé en flamand *schorre* et des vases qui n'ont pas encore complètement échappé au flux et qu'on dénomme *slikke*.

Fig. 2. Diguette-piège à vases marines en Frise allemande : Mer du Nord. Matériaux de construction : rondins résineux et fascines ou fagots.

Voici la composition de la vase fixée (2) :

Site	Eléments fins inf. à 20 μ %	Humus %	Matiéres organ. %	pH superficiel
Région de Wiedingharde				
Site I : Frise allemande (Slesvig) zone à schorre sans végétation)	60 à 70 %	3,5 %	4 %	7,7
Site I : Zone à glyceria maritima (misottes) ..	70 %	5 %	8,5 %	7,6
Site II : Frise hollandaise (Pays-Bas)	45 % < 16 μ	6,5 %	—	7,5

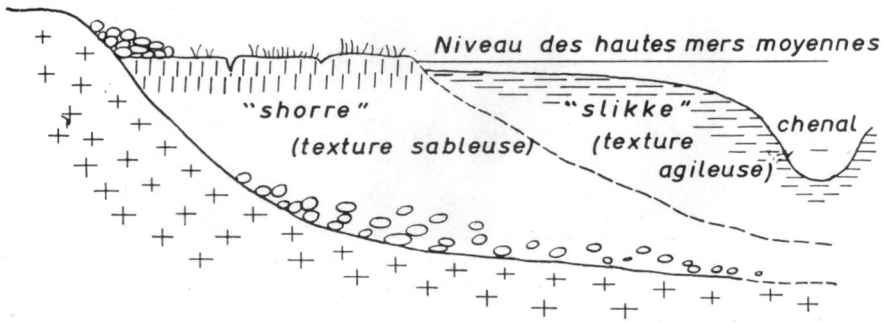
II. — Processus du dépôt des vases.

J. BOURCART et C. FRANCIS-BŒUF (1) estiment que la vase ne se forme qu'au moment où une quantité suffisante de matière organique essentiellement d'origine végétale et transportée par les eaux se mélange à elle, en formant des voiles comparables à ceux d'un collage (vinifica-

(1) La vase, par Jacques BOURCART et C. FRANCIS-BŒUF, Hermann et Cie, Editeurs Paris 1942.
(2) D'après les analyses que nous a donné M. G. PULS, Conseiller en aménagement foncier à HUSUM (Slesvig) et dont nous le remercions.

tion). C'est la naissance même du complexe argilo-humique. Ils ont noté en effet, en mer, la présence d'une purée d'algues (algon) poussée vers les côtes par les courants.

Les spécialistes néerlandais penchent plutôt pour une participation plus nette des mollusques : moules, myas (clauque ou bec de jars), cardiums (bucardes ou coques), aspirant de grandes quantités d'eau de mer dont ils assimilent les éléments nutritifs et rejettent les éléments fins (argile) sous forme de grumeaux qui, plus denses que le voile, se déposent plus rapidement. Par temps calme, des bancs de schorre qui, sans l'action des mollusques, ne seraient que sableux (5 p. 100 d'éléments fins seulement) se recouvrent d'un film d'argile : le slikke ; emporté par la marée, il se déposera naturellement dans les zones à eaux calmes. C'est le cas des côtes des Charentes où s'étendent de vastes parcs à huîtres : sans le secours de l'homme, ces vases s'y déposent dans les golfes calmes, les



GRAPHIQUE 1. — Formation des dépôts marins (d'après J. BOURCART et C. Francis BŒUF).

estuaires, les embouchures, à l'abri des courants du large et protégés par des kilomètres de hauts fonds contre la houle.

Ce n'est pas le cas des côtes plates de Frise, le long de la Mer du Nord, où le « piégeage » par des digues de fascines est devenu la règle si l'on veut amener une sédimentation plus rapide de ces vases argileuses et faire en sorte que leur épaisseur, patiemment accrue en 10 ans, puisse fournir le support d'une agriculture intensive ultérieurement : il est normal qu'en un pays où le diluvium glaciaire de la calotte holarctique n'a laissé que peu d'argile, on recherche tout complexe argilo-humique, où qu'il s'offre.

A marée basse, et dès avant l'envahissement par les salicornes, le slikke déposé se couvre de myriades d'escargots de vase et de divers mollusques dont les carapaces amélioreront ultérieurement le sol en calcaire : amendement calcaire et organique en même temps, d'origine biologique.

Quant à la *richesse des eaux en vase*, elle varie énormément dans le

temps et dans l'espace selon la turbulence des eaux et le délai qui s'est écoulé depuis la dernière tempête : de 20 à 30 mg par litre d'eau de mer, la proportion se multiplie par 100 : 2 à 3 g de vase (poids sec) par litre.

Le dépôt se produit dès que cesse la turbulence des eaux et lorsque la pellicule d'eau est mince. Au-dessus des vases déjà déposées (slikke) à pente presque nulle, l'eau chargée se retire lentement, tandis que les phénomènes d'attraction de toute masse dotée de pouvoir absorbant, entrent en action. Les particules appelées par les auteurs flocons ou écume se collent par adsorption à la surface du slikke : c'est la naissance même du complexe argilo-humique (vase + algon).

Dès que le dépôt s'est consolidé grâce à quelque répit entre les grandes marées, un *herbier* d'algues diverses (voir fig. 2) s'établit.

Ecologiquement, c'est le signe qu'il ne sera plus submergé par les eaux vaseuses : en effet, *Fucus serratus* et *Himanthalia* qui s'y installent, sont des algues à zones claires et très aérées (op. cit.).

III. — Dynamique des vases, du dépôt du slikke au bri géologique.

Quand il n'est pas sableux, le slikke devenu schorre, se dessèche progressivement, se crevasse et la vase évolue très lentement vers un milieu fin et à microporosité élevée. Les auteurs (op. cit.) précisent que « ce sont les alternatives répétées de pluies et de sécheresse qui permettent une transformation progressive de la vase du slikke en schorre, mais les processus exacts sont encore très mal connus. »

Sans doute, peut-on avancer cependant que, plus un littoral en pente faible est soumis à de fréquentes pluies séparées de brèves périodes de sécheresse, plus il se consolide rapidement. Une explication serait ainsi donnée au contraste existant entre les récupérations de vases sous climat nordique ou tempéré et leur faible importance sous les climats chauds à longues périodes de pluie ou de sécheresse (embouchure des fleuves nord-africains puis, en région tropicale, zone à poto-poto (Gabon), dit encore mangrove.

C'est actuellement par dizaines de milliers d'hectares que se comptent les prises faites sur la mer le long des côtes occidentales de l'Europe du nord : nous verrons, plus loin les divers stades pédologiques atteints et les divers potentiels obtenus par l'homme, au prix de quels travaux. Encore ne comptons-nous pas dans ces superficies celle des polders récupérés après pompages, technique toute différente de celle de « piégeage » des vases qui nous occupe ici. Quant aux rivages français, le dépôt s'y fait naturellement et, depuis des siècles déjà, il se poursuit sur de petites surfaces, en toute liberté, dans des golfes tranquilles.

a) **Composition physique et chimique des vases** :

Directeur du Service « Science du Sol » à Groningue (Pays-Bas), HISSINK a établi la nature originelle des vases et leur dynamique jusqu'au type appelé en Charente « bri ».

HISSINK précise qu'au début, avec une couleur assez noirâtre due à la présence de sulfure de fer, l'humidité était, en moyenne, de 172 g d'eau par 100 g de matière sèche. Autrement dit, lors de leur dépôt, ces vases contiennent 63 p. 100 d'eau salée à la concentration de 1,6 p. 100 soit 1 p. 100 de sel marin environ.

Composition	D'après Hissink	D'après d'autres auteurs allemands
Sable	19,7 %	17 à 27 %
Argile	61,6 %	60 à 70 % d'éléments inf. à 20 µ
Humus	3,66 %	3,5 %
CO_3Ca (1)	12,2 %	7 %
NaCl (approximatif)	1 %	1 %
Divers	1,84 %	1,5 %

Dès que les saisons à alternances bien contrastées de pluie et de sécheresse favorisent l'évolution, le schorre *s'assainit en se craquelant* : ainsi craquelé, il ouvrira les voies aux eaux, de la pénétration d'abord, du ruissellement ensuite dans ces crevasses, vers les thalwegs naturels.

De noire au début, la vase devient grise et plus sèche, mais elle est encore sodique ou sodico-magnésienne alors que l'agriculteur ne peut travailler utilement que des argiles calciques.

Le lessivage naturel se fait si la vase est riche en carbonate de chaux : dissout par le gaz carbonique des fermentations de tout milieu en activité biologique, l'ion calcium déplace l'ion sodique qu'on doit laver par les eaux de drainage si l'on ne veut pas assister à l'invasion de la réaction inverse.

Pour assainir chimiquement un dépôt de vases marines, sans apport chimique, il faut un milieu calcaire, des pluies entraînant percolation et un système de drainage établi à une profondeur suffisante. C'est le processus observé en sols de bri, en France, tant qu'ils comportent encore du calcaire. Si le milieu n'en comporte pas, il faudra recourir au plâtre ou au superphosphate qui en contient environ 50 p. 100 et, pour développer son contact avec des horizons salés, l'incorporer au milieu par des façons énergiques (difficiles à réussir).

(1) HURIEZ note à 1,3 p. 100 de calcaire (CO_3Ca) dans le marais de Genouillé (Charente-Maritime), VERDIÉ, SILORET et FRANC DE FERRIÈRE : 0 à 20 p. 100 dans les Marais de Saint-Hippolyte et de Tangon.

b) **Les vases marines, milieu biologique :**

1. — Quelle flore recouvre, quelle faune habite la pellicule aérée de la vase?

Comme en tout milieu marin, dominent les diatomées apportées par les eaux et les algues bleues et vertes, puis survient la première faune, infusoires, rotifères et foraminifères (J. BOURCART et FRANCIS-BŒUF) ; enfin, toute une population de nematodes et d'annelidés. La couleur de la pellicule superficielle s'éclaircit, dès lors.

Les auteurs ont noté également le développement d'une abondante vie microbienne : sarcines à pigment rose ou vert, suivant le degré d'oxygénation, des bactéries destructrices de la cellulose et des microbactéries, prolifération due à celle, concomitante, des diatomées qu'on sait productrices à la fois d'oxygène et d'hydrates de carbone.

Mais à quelques millimètres de profondeur, on ne s'attendra pas à trouver autre chose qu'une population anaérobie et beaucoup moins dense, jouant dès lors le même *rôle réducteur* que le feraient les racines privées d'air, tandis qu'apparaîtrait un horizon dit à Gley.

L'essentiel de leurs caractéristiques est ainsi donné aux vases par les colonies microbiennes habitant l'humus comme la naissance du slikke avait été provoquée et par l'algon à proximité de l'herbier à algues marines et par la digestion des mollusques.

2° Mais une fois la vase abandonnée au littoral, toute son évolution biologique est tributaire des colonies de diatomées, créatrices, à leur tour, de la matière vivante puisqu'elles *ouvrent* les conditions de vie favorables aux nitrobactéries, aux ferrobactéries et autres colonies utiles (opus cit.).

Toute cette concentration de vie donne plus de solidité à la pellicule superficielle et elle devient l'abri d'êtres vivants supérieurs : arénicoles, lamellibranches, annelides tubicoles s'y incrustent.

Ainsi, des fouisseurs du genre colembole, complètent l'action assainissante des galeries des arénicoles et, passant de l'état ferreux à l'état ferrique, les oxydes colorent en ocre les galeries et les tubes ainsi creusés.

3° C'est à ce stade où l'imperméabilité originaire du slikke cède que le dépôt vaseux devient *schorre*, c'est-à-dire que la *vase* marine devient *palus*, *bri*, *molière* ou *bas-champ* [1], selon la désignation locale de la région où il se produit : la dessalure peut également s'accélérer si un réseau de drainage suffisant a été établi, comme nous le verrons en sites I et III.

La présence de lamellibranches prouve aussi la possibilité de cultures d'huîtres qui sont une production classique et très superficielle du slikke (ostréiculture).

[1] Voir « Les sols de la plaine maritime picarde (Marquenterre et Bas-Champ) par G. JORET et H. MALTERRE. An. Agron. n° 1 et 2, 1939.

c) Évolution du soufre et du fer

J. BOURCART et C. FRANCIS-BŒUF notent que la teneur en sulfure de fer, généralement attribuée à la décomposition de la matière organique, dépasse nettement celle que peuvent laisser la décomposition de protéines (tant est faible leur présence dans les matières organiques de la vase).

Ils rapportent les travaux de plusieurs auteurs russes qui établissent que ce sulfure de fer est un hydrogel de monosulfure ferreux dû à l'*action réductrice des bactéries* sur les sulfates alcalins contenus dans l'eau de mer.

Si, à la partie supérieure, les vases deviennent grises, puis brunes ou même rouges, c'est que l'action des sulfobactéries a transformé les hydrogels de sulfure de fer en hydroxydes ferriques. Trois groupes de bactéries agissent ainsi aux dépens des sulfates alcalins et enrichissent les vases en soufre.

Vivent, en effet, en symbiose, en toute vase marine :

1° En milieu anaérobie, des bactéries destructrices de sulfates.

2° En milieu aérobie, des bactéries transformant les sulfures en sulfates, suivant un cycle bactérien qu'on peut utilement rapprocher de celui de l'azote commandé par les bactéries dénitrifiantes et les nitrobactéries (J. BOURCART et C. FRANCIS-BŒUF).

Ainsi s'explique la teneur des sols de bri en soufre et la facilité avec laquelle ils prennent l'odeur d'œuf pourri au contact d'HCl.

Mais comment expliquer leur haute teneur en fer responsable de leur couleur noire s'il est à l'état réduit, de leur couleur rouille s'il est oxydé? Ce fer est très finement et régulièrement réparti dans toute la masse du bri, heureux présage quand on sait combien il aidera à l'élimination des excès de calcaire, comme à l'amélioration de la structure.

Les eaux des estuaires ne contiennent, en général, que 0,04 mg de fer par litre, alors que l'eau d'imbibition des vases en contient 3 p. 100, concentration qui ne peut s'expliquer par les évaporations successives du milieu vaseux. Le bri charentais fait apparaître 3,81 p. 100 de fer à l'analyse (1).

Il faut admettre l'action de ferro-bactéries, vivant comme l'ont déjà démontré, depuis 1836, divers auteurs, dans le voile de surface ou dans les enduits des vasiers, en milieu strictement aérobie et concentrant le fer sous forme de très fins granules d'hydroxyde ferrique, qui les encroûtent. Ces auteurs ont observé le mécanisme suivant :

La chute du voile devenu trop épais, le recouvrement de l'enduit par une nouvelle couche de vase, transforment les conditions du milieu qui devient anaérobie, permettant le développement des bactéries destructrices des sulfates. L'hydroxyde de fer est ainsi transformé en sulfure

(1) Partie extraite à l'acide chlorhydrique.

ou peut-être, dans certains cas (vases des eaux douces) en sels organiques (opus cit.).

Tout ce fer à l'état de sulfure, ajoutent les auteurs, ou de sels organiques, fait partie intégrante du *liant* des vases et nous savons l'importance du fer dans la bonne structure des sols. Encore ne faudrait-il pas que l'excès d'argile sodique l'empêche de manifester cette action favorable.

Si certains auteurs ont estimé qu'une teneur de 10 p. 100 de matières organiques évaluée en M. S. pouvait être considérée comme négligeable, il faut cependant reconnaître que la place occupée par l'hydrogel correspondant, en milieu humide, est relativement beaucoup plus importante : son rôle dans le comportement physique du milieu, le prouve.

Telles sont les *origines du soufre* et du *fer* dans les vases. Il y a analogie avec ce qui a été observé dans les marais tourbeux où s'accumulent des dépôts de fer, où l'on retrouve l'association de la pyrite avec le lignite ou la houille.

La concentration en matière organique, par la vie bactérienne qu'elle appelle, semble être très souvent accompagnée d'une concentration en fer.

Après un dépôt lent d'une matière assez pauvre, si ce n'est en éléments fins, la vie microbienne, les mollusques, puis les sulfo et les ferrobactéries ont créé en quelques années ces vases marines riches en fer et en soufre.

Puis le temps a agi : l'évolution climatique limitée, pour raison d'imperméabilité, aux horizons très superficiels, a commencé par éliminer une partie du chlore du sel et le calcaire, mais il reste encore beaucoup d'éléments minéraux. L'agronome doit pouvoir apprécier comment et jusqu'à quel point ces constituants chimiques en milieu alcalin vont aider ou contrarier ses projets de mise en valeur.

B. — STADES D'ÉVOLUTION DES ALLUVIAUX MARITIMES SELON LES SITES ÉTUDIÉS ÉTUDE DÉTAILLÉE DU STADE LE PLUS ÉVOLUÉ

Aux sites I et II (Frise allemande ou néerlandaise), nous avons trouvé le stade naissant : *sol alluvial classé dans le groupe azonal. (non évolué)*

Aux sites III et IV (Aunis), de longues observations nous ont mené devant 3 stades imposés par la topographie :

a) *En milieu non inondable* : *sol brun légèrement lessivé* A. C.

b) *En milieu humide* : *mull calcique sur sol brun.*

c) *En milieu inondable* : *mor sur mull calcique sur sol brun,* le mor prenant une importance d'autant plus grande (jusqu'à 6 et 8 cm d'épaisseur) que la période d'inondation annuelle est plus prolongée (3 mois).

Nous pouvons donc présenter les trois profils a, b, c ci-dessus, d'un même niveau géologique soumis au même climat local et à la même inculture (prés-marais naturels, ne recevant ni soins, ni fumure, ni entretien) mais placés à des *niveaux topographiques différents* dans l'enceinte cependant d'un même marais, lieudit La Petite Flandre, près de l'Ile d'Albe au nord de la route nationale 11 de Rochefort à Muron : alt. 2 m.

Étudions ici le profil le plus évolué, celui du mor-mull calcique sur bri d'Aunis.

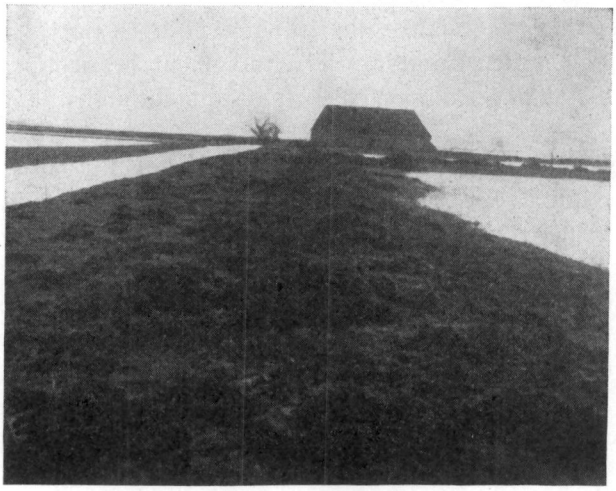


Fig. 3. — Marais de Rochefort en février (niveau approximatif des mers moyennes).

Au-dessus d'un faible sol brun, nous remarquons dans l'horizon Ao trois niveaux, différents d'aspect et d'importance, dans l'ordre suivant :

— En surface, la couche L_1 dénommée litière formée de plusieurs cm de débris de végétaux (tiges, racines, stolons, rhizomes, feuilles, etc.) : niveau principal du mor tourbeux.

Note : Pareils lais et relais de mer anciens se retrouvent également en France sur les côtes picardes de part et d'autre des embouchures de l'Authie, de la Maye et de la Somme jusqu'à Ault exactement. Le remblaiement dernier date du XIIIe siècle, époque depuis laquelle l'extension des marais se poursuit régulièrement par la « renclôture » des *molières* : ce sont aussi les *bas-champs*.

Ces molières correspondent aux bancs d'alluviaux maritimes abandonnés par la mer et non exploités tant qu'ils n'ont pas atteint, naturellement, un certain niveau : ils restent encore submergés aux grandes marées d'où leur végétation halophile. Une même richesse en soude, en magnésie et en potasse que les sols de bri, les caractérise mais une densité démographique plus élevée, des besoins de terres plus évidents, une technique plus hardie ont amené les riverains de la Picardie à une conception plus intensive de la culture.

Par rapport aux sites III et IV de l'Aunis et de la Saintonge, les *molières* et les *bas-champs* représentent un stade plus artificialisé encore. Poussés aux cultures intensives par une rotation où se succèdent plantes sarclées, céréales d'hiver et céréales de printemps, ces alluviaux du Marquenterre préfigurent ce que pourraient devenir les marais saintongeais après des années de cultures suivies, lorsque le sol de bri se sera affiné et « dégourdi ».

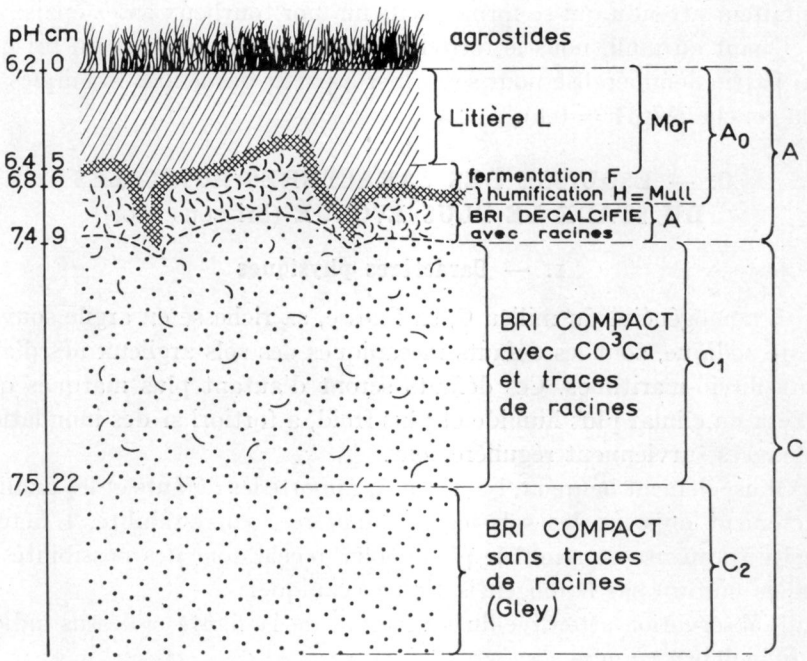
Ces sols du Marquenterre ayant été très étudiés dès avant 1939 par MM. JORET et MALTERRE, nous croyons utile d'y renvoyer le lecteur [1].

[1] Les sols de la plaine maritime picarde par J. JORET et H. MALTERRE (Op. cit.).

— Au dessous, la couche F, dite de fermentation, à forte activité microbienne, de couleur plus foncée, marron : niveau second du *mor tourbeux*.

— Au-dessous, la couche H, humifiée, riche en humus colloïdal, conférant au bri décalcifié qu'il imprègne largement, une couleur chocolat et une excellente structure : niveau de *mull calcique*.

Si les couches L et F occupent la plus grande partie du profil Ao, la couche H ne représente que quelques millimètres.



GRAPHIQUE 2. — Bri d'aunis. Détail du Mor A_0 en parcelle inondée 3 mois. (Présence de Mor sur Mull calcique sur sol brun).

Au-dessous, sans transition autre qu'une légère amélioration de structure et de perméabilité, due à l'humus colloïdal, se trouve la roche-mère C, superficiellement à l'état de sol brun, puisqu'on mesure une certaine décalcification des premiers cms, pH < 7 (voir profil dessiné ci-contre).

Remarque : Étant donné le pH situé entre 6,5 et 7,2, étant donné le pH des eaux qui baignent ce profil 3 mois par an (pH = 8), l'humification et la minéralisation de ce manteau de débris végétaux devraient être plus avancés et plus rapides. Or, ils sont lents : cette épaisseur le prouve, ainsi que la faiblesse de la végétation climacique observée.

C'est donc que deux phénomènes saisonniers s'y opposent :

Le premier est le retour régulier de la sécheresse estivale qui stoppe

activité toute microbienne et condamne une partie de la litière à une inertie définitive (action irréversible de la sécheresse sur la tourbe.) Le second est le retour, non moins régulier, des inondations hivernales. Elles donnent le pas aux fermentations anaérobies qui entraînent un ralentissement considérable de la décomposition.

L'évolution chimique est très différente : la cellulose se résorbe et la lignine s'accumule.

L'acidification n'est pas nécessairement marquée puisque le pH n'est ici que de 6,5 ; malgré la présence d'eaux à pH = 8, ce n'est pas le mull bienfaiteur attendu qui se forme, mais un mor tourbeux assez épais.

Quant au mull, nous le retrouvons plus bas au contact du bri qu'il a en partie déminéralisé pour se former à partir des acides humiques nés de la couche F (pH = 6,8).

C. — ESQUISSE DES CARACTÈRES AGRICOLES DU STADE LE PLUS ÉVOLUÉ (bri sous mor)

1. — Caractères physiques

L'homogénéité du milieu C, sa finesse, sa richesse en argile souvent encore sodique, sont les défauts mécaniques des sols argileux nés d'alluviaux fluvio-maritimes. Ces défauts seront d'autant plus marqués qu'il règnera un climat plus humide et plus froid, a fortiori si des inondations prolongées surviennent régulièrement.

Mais, élément heureux, l'horizon A_0 apporte les défauts et les qualités exactement opposés des sols légers humifères, sans stabilité. L'hétérogénéité frappante du profil le plus évolué recèle donc des possibilités de mise en culture par homogénéisation mécanique.

L'observation attentive du seul profil de la figure ci-dessus indique les difficultés à vaincre.

2. — Caractères chimiques

En contrepartie, les sols de bri sont originellement riches en potasse et la présence de fer (à défaut parfois de calcaire) assurera une bonne structure dès que l'enrichissement en *humus jeune*, le seul qui parvienne à s'allier assez intimement à l'argile, sera assuré et que la perméabilité qu'il aura améliorée aura permis à la soude de migrer vers les drains.

On notera également que la teneur en acide phosphorique est relativement faible par rapport à la teneur en potasse, en calcaire échangeable, en magnésie, en sodium et en chlore. Enfin, ces éléments intéresseront l'agronome s'il veut comprendre, lors de l'étude de la flore et de ses associations, les limites imposées par ce milieu à peine zonal aux introductions d'espèces ou de variétés fourragères ou alimentaires jusque-là exploitées sur des milieux plus évolués.

3. — Caractères biologiques

Le profil typique de la page précédente indique une absence de vie aérobie totale à 22 cm seulement dans le cas de bri inondé n'ayant jamais connu la charrue.

Comme l'étude du climat nous le révèlera, l'intense évaporation estivale que supportent ces sols jointe à l'inertie totale d'un milieu encore trop sodique et asphyxiant, ne leur permet pas d'être très productifs. On pourrait croire, cependant, que les plantes prairiales trouveront à quelques centimètres de profondeur l'humidité résurgente provenant des fossés et canaux de drainage et par simples mouvements latéraux. Or, telle qu'elle est, la structure du bri s'y oppose complètement : à quelques décimètres de fossés pleins, l'aridité s'installe dès juillet.

D. — CARACTÈRES AGRICOLES DES SOLS ISSUS D'ALLUVIAUX MARITIMES

Ainsi, quelques avertissements se dessinent déjà :

I. — Dans le cas où l'assainissement complet n'est pas possible avec abaissement du plan d'eau à un étiage suffisant pour que le Gley puisse disparaître de la couche superficielle, le labour destiné à rendre une structure à ces sols lourds sera contre-indiqué : la première inondation détruirait les mottes éclatées obtenues par le labour d'été et emporterait par flottage tout l'humus libéré.

L'exploitant sera donc obligé de cultiver un « climax » avec toutes les chances d'un rendement peut-être productif, mais limité en quantité et en qualité (régime extensif actuellement très répandu que les Services Agricoles espèrent modifier).

II. — Dans le cas où l'assainissement sera possible, le bénéficiaire assuré de ne plus revoir ses « bris » recouverts d'eau trois mois de suite en hiver, ne devra pas croire que cela suffit à redresser la productivité de son marais.

Devront suivre, en effet, *plâtrage* en cas de dessalure insuffisante, puis, après un temps de repos, *labours mesurés d'été* (après que le plâtre aura agi), *après destruction par fauchaison (avant maturité des graines) de la flore adventice, façons superficielles* nombreuses autant pour *réduire les mottes* en fin d'été ou après les hivers sans gel important que pour *homogénéiser* cette association bri-mor qui ne montre guère d'affinité immédiate à la fusion, enfin, mise en *cultures-pionniers* durant deux ou trois ans avant semis du mélange prairial convoité.

Voyons, en deuxième partie, comment l'étude plus détaillée des conditions de milieu impose ce plan logique à l'exploitant de sols d'alluviaux maritimes.

DEUXIÈME PARTIE

PÉDOLOGIE

A. — ROLES RESPECTIFS DU CLIMAT, DU RELIEF, DE LA VÉGÉTATION ET DE L'HOMME DANS LE COMPORTEMENT ACTUEL DES ALLUVIAUX MARITIMES

1. — Le climat :

Comme le montre le relevé moyen des Stations de Frise allemande (1) (alt. 8 m) et de la Coubre (alt. 6 m), les climats respectifs qui règnent au-dessus des sites I et II d'une part, III et IV d'autre part, diffèrent d'abord par la température (6°4 d'écart entre les moyennes des t° max. et 3°3 d'écart entre les moyennes des t° min.). Ils diffèrent aussi par la saison des pluviosités maximales. En Frise, les pluies de juillet à octobre apportent mensuellement presque 80 mm d'eau en moyenne, alors qu'en Aunis, c'est aux pluies d'octobre à décembre d'apporter chaque mois plus de 85 mm d'eau.

Quant à la hauteur annuelle des pluies et au nombre de jours de pluies, ils sont identiques au long de ce même littoral occidental où, seul, le nom des mers change.

	Moy. ou total	*Climat de Husum* (Frise allemande) Sites I & II moyenne 1891-1930											
		Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Temp. max..	10,9	2,4	2,8	3,4	9,9	15,3	18,4	20,3	19,4	16,9	11,8	6,8	3,8
Temp. min ..	5,2	— 1,3	— 1,3	0,2	3	7	10,4	12,7	12,5	10,2	6,4	2,5	0,2
Pluies mm...	679	47	41	41	40	41	46	64	89	71	76	61	62
Nb de jours.	150	12	10	10	10	9	9	11	14	11	13	13	14
	Moy. ou total	*Climat de Rochefort* (Station de la Coubre) Sites III & IV (Charente Maritime) moyenne 1900-1940											
		Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Temp. max..	17,3	9,2	11	13,4	16,2	20,1	23,0	25,1	23,3	18,3	12,8	10,3	17,3
Temp. min ..	8,5	2,8	3	4,4	6,8	10,1	12,8	14,8	14,7	12,7	9,5	5,8	4,3
Pluies mm...	682	60	55	51	46	43	43	37	42	49	82	86	88
Nb de jours.	150	16	13	12	14	11	9	10	10	9	13	16	17

Mais la confrontation des seules températures et chutes de pluies annuelles ne peut traduire les différences de l'action de ces climats sur les sols et sur les plantes prairiales ou cultivées comme sur leur comportement annuel.

(1) Relevé dont nous remercions le Dr G. BELL, président du service météorologique à Offenbach (Slesvig).

Une étude globale s'imposerait qui dépasse le cadre de ces lignes, mais nous pouvons déjà affirmer que, de la Frise allemande et de l'Aunis, c'est la seconde région qui souffre relativement le plus d'aridité et de carence en eau en été. D'autre part, si l'on calcule de semaine en semaine et de mois en mois le bilan d'eau (P — E. T.), c'est-à-dire la *différence entre les précipitations* (P) *et l'évapo-transpiration* (E. T.), il apparaît que les périodes de sécheresse vont de mai à juin en Frise et de juin à septembre en Aunis.

Action relative sur les sols

Si, abandonnant un instant la méthode globale où devraient intervenir l'*actinologie* ou mesure du rayonnement solaire et ses propriétés, l'*écologie fonctionnelle* ou éthologie, nous en restons à l'indice d'Aridité de de MARTONNE $Ar = \frac{P}{T + 10}$, nous voyons qu'il vaut 36,6 en Frise et 29,7 en Aunis. En Frise, il indique que les sols ont une légère tendance à la podzolisation, tandis qu'en Aunis, l'équilibre dynamique est assuré : nous en sommes donc aux sols bruns. Du point de vue pédologique, ces climats sont donc extrêmement voisins et figurent, sur la carte d'Agafonoff, dans une seule et même zone climatique. On concluera, après cette brève constatation, qu'une seule et même zône climatique des pédologues couvre, en général, plusieurs aires géographiques culturales telles que les conçoit l'écologiste, le généticien ou l'agriculteur.

Action relative sur la végétation

Dépouillant ces mêmes indications météorologiques, TURC a déterminé qu'en comptant une réserve en eau dans le sol de 40 mm, le déficit serait de 348 mm en Aunis, contre 48 mm seulement en Frise dans les mêmes conditions.

Les mois présentant un déficit préjudiciable à la végétation prairiale de ces régions sont :

en Aunis : mai à septembre ;
en Frise : juin et juillet.

En conséquence, une évapo-transpiration maximum serait maintenue pendant ces mois-ci par des irrigations équivalentes :

à 3 480 m³ à l'ha en Aunis
et à 480 m³ à l'ha en Frise.

Encore faut-il disposer d'eau à bon marché pour que l'unité fourragère supplémentaire ainsi procurée ne revienne pas à plus de 8 ou 10 fr. Ceci exige que le m³ d'eau ne coûte pas plus de 5 à 10 fr, selon que le rendement s'avère de 2 ou 1 U. F. par m³ d'eau irrigué.

II. — Le relief.

Aussi bien en Frise qu'en Aunis, le relief est nul ou très voisin des basses mers. De plus, en Frise, les Koog (1) issus des schorre, doivent être protégés des hautes mers et des tempêtes par des digues importantes qui ne se justifient pas en Aunis ; dépôts de fonds de golfes ou d'estuaires. Par contre, si les travaux de captage des vases marines expliquent la parfaite topographie des koog, il n'en est malheureusement pas de même en Aunis où des inégalités de plus d'un mètre de dénivellation apparaissent entre parcelles, cependant voisines.

Ces périmètres déprimés se présentent donc comme des cuvettes localisées, d'autant plus difficiles à assainir que l'altitude de l'ensemble du marais est déjà très rapprochée de celle des marées basses d'une part : l'eau y stagnera trois mois (voir fig. 3 à la date du 15 février 1958) en année normale, toute l'année si, comme en 1958, la pluviosité est anormale.

D'autre part, des décisions ont été prises par le Syndicat des Marais, qui interdisent les premières purges avant le 15 février, sans doute pour conserver aux sols leur température grâce à la *protection du volant thermique de ces eaux* (température enregistrée les 15 et 16 février 1958 : 16°C).

Mais, qu'il s'agisse de la Frise ou de l'Aunis, les caractères hydriques conférés par le relief sont les mêmes : comme en tout alluvial récent, s'impose la présence d'une nappe phréatique proche, avec ses inconvénients si elle reste sauvage, avec ses avantages considérables si elle peut être domestiquée.

III. — La végétation et l'homme :

Les marais issus d'alluviaux maritimes se présentent ainsi à nous dans tous les stades, depuis celui de la création jusqu'à celui de l'exploitation productive d'un profil déjà en partie modifié. Voyons préalablement quel type de flore s'installe sur chaque faciès et quelle est sa dynamique naturelle.

En site I, de type azonal (alluvial naissant). Si nous reprenons le site I de la Frise occidentale allemande, la végétation débute, sur les vases découvrant : à marée basse

par *Salicornia herbacea* (vers la 2e ou 3e année)
puis *Spartina townsendii*
puis *Suaeda maritima* (soude)
puis *Atriplex littorale* (arroche)
puis *Aster tripolium*, vers la 5e ou 6e année.

comme les représente la figure ci-contre (fig. 4).

(1) On entend par *Koog* en Frise, les ensembles récupérés d'abord sur les vases marines par atterrissements successifs et endigués ensuite par mesure de protection. Ce *Koog* peut être opposé au *polder* qui naît d'un *endiguement préalable* de tout un secteur noyé que, progressivement, on assainit par des pompages prolongés.

Enfin, apparaît *Glyceria maritima* (1) graminée riche en iode que le pacage extensif par ovins ou bovins frisons permet d'exploiter. Toute cette évolution demande, en général, 10 ans. Après l'envahissement de Glyceria maritima, graminée indicatrice d'une première dessalure, commencent à s'installer, naturellement, les graminées suivantes des prairies permanentes :

Ray-grass anglais (lolium perenne)
Fléole (phleum pratense)

Fig. 4. — Flore halophile des « slikke » frisons
en progrès au fur et à mesure de l'amincissement de la couche d'eau à marée haute.
Depuis *Salicoriria* (à droite) jusqu'à *Glyceria maritima* (à gauche).

Trèfle rampant (trifolium repens)
Paturin des prés (poa pratense)
Cretelle (cynosurus cristatus).

Le pacage à moutons (pré-salé) puis à bovins, tel que le représente la fig. ci-contre d'un koog du Slesvig, s'est établi *naturellement* et en 10 ans, au moins. Dès que la structure de ces sols lourds aura été améliorée par la prairie et la matière organique qu'elle aura abandonnée, le lotissement

(1) Glyceria maritima ou Pucciniella ou Atropis ou « Manna grass » angl. : Sorte de paturin aquatique vivace formant des colonies au bord des eaux et dans les mares et étangs peu profonds, forme de véritables prairies flottantes. La variété G. maritima constitue la première végétation exploitable par les ovins ou les bovins, aussi bien en Frise qu'en Aunis charentaise où elle prend le nom local de « misotte ».

surviendra et la mise en culture intensive suivra, par exploitation de 7 à 15 hectares.

Le processus est exactement le même, en *site II*, qui bénéficie d'un même climat.

***

En site III du Marais de Rochefort, nous retrouvons en prés-salés tout au bord de la mer, les « misottes » argileux que recouvrent les embruns, à marée haute, lorsque le vent souffle de la mer.

Site IIIa. — Dans ces prés-salés viennent aussi des salicornes, ainsi que les halophiles suivantes (opus cit.) : obione portulacoïdes,

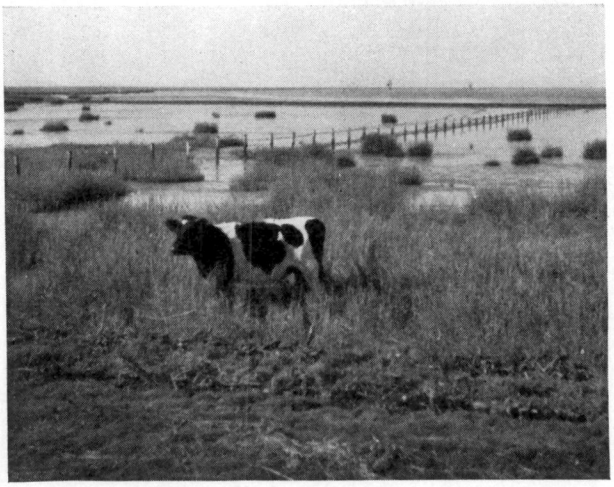


Fig. 5. — Envahissement ultérieur par Glyceria maritima-misottes frisonnes.

suaeda fruticosa, salicornia herbacea, spartina maritima, agropyrum repens, salsola soda... végétation dont, malheureusement, nous ne connaissons pas la dynamique et les indications écologiques visant notamment le degré de dessalure et la succession dans le temps.

Site IIIb. — A l'abri des embruns, nous trouvons *plusieurs types de flore* selon que la nappe d'eau hivernale est plus profonde et plus durable (caractères liés).

Le tableau ci-après indique ces variations qui correspondent aussi à la nature pédologique du milieu. Nous rappelons, en effet, que se rencontrent à la fois les trois types suivants étudiés d'après la durée de leur submersion hivernale :

a) en zone sèche : sol brun, dit bri ;

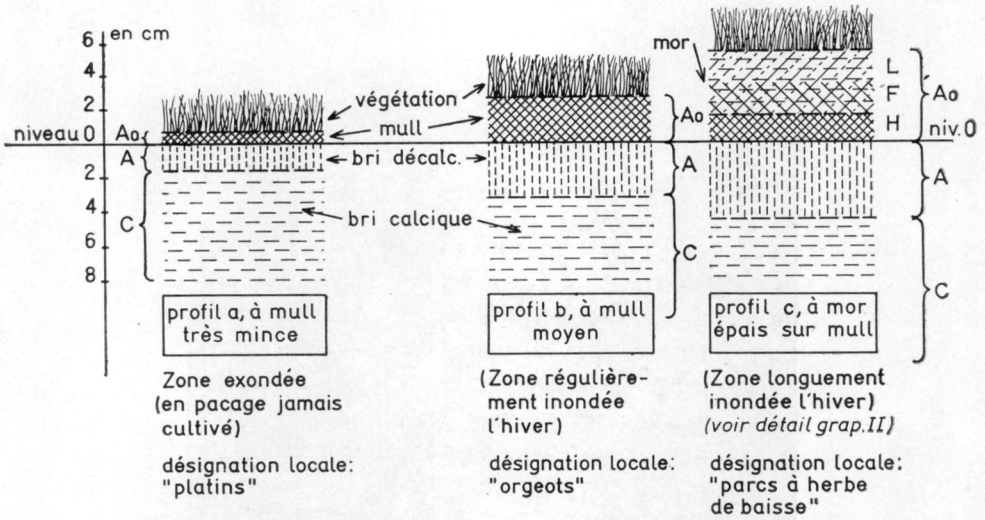
b) en zone humide : mull calcique sur sol brun (bri) ;

c) en zone inondée l'hiver : mor tourbeux sur mull calcique et sol brun (bri) ;

d) en zone inondée toute l'année : fond des fossés de drainage (voir note 1) (sols noirs gleyifiés).

COMPORTEMENT DE LA FLORE PRAIRIALE MARAICHINE A TRAVERS LES SAISONS :

Dès que les pluies d'automne réhumectent les sols de bri, la végétation reprend de graine, de bulbe, de stolons ou de rhizomes. La dessication estivale, aggravée par le point de flétrissement élevé des sols tour-



GRAPHIQUE 3. — Schéma comparatif démontrant l'hétérogénéité qu'apporte dans le profil du bri le séjour hivernal plus ou moins prolongé de l'eau (eau non salée provenant des pluies).

Remarques : L'humus doux (mull) tapisse le bri décalcifié et les racines s'étalent étroitement sur ces surfaces de contact, entre le mor et le bri.
Les crevasses estivales du Bri sont invisibles du fait du manteau relativement épais de mor tourbeux, mais elles apparaissent sur la coupe.

beux a provoqué la mort de tous les végétaux depuis le mois de juillet, sauf dans les secteurs à l'état de sol brun échappant aux inondations (où le mull minéralise rapidement au contact du bri).

Nous pouvons donc concevoir trois comportements du milieu climacique selon qu'il est dans l'un ou l'autre des stades pédologiques étudiés, en fonction de la hauteur d'eau de l'inondation annuelle et de la durée de la stagnation.

I. — *sur sol brun* : (parcs à « *platins* ») pas d'inondation annuelle. En été, la végétation ralentie prend un aspect xérophyte : prédomi-

(1) Flore des fossés de drainage : envahissement de salicaires, iris pseudo-acore, massette (typha-latifolia), cardère (dipsacus sylv.), grande oseille (R. patientia), liserons (convolvulus sepium), guimauve (althaea offic.), nymphea (nymphea alba).
Dimensions des fossés : ouverture 3,50 m, largeur au fond 1 m, profondeur 2 m.

nance des *hordeum, trifolium fragiferum* et *agrostis stolonifera (sporadique)*. En fin d'hiver, la douceur de la température aidant, le tapis végétal reverdit sans cependant démarrer avant mars. La première végétation en février est celle des *carex*, puis, dans l'ordre, *agrostis stolonifera, rumex patientia, r. hydrolapatum, lolium perenne, alopecurus bulbosus, mentha pulegium, cirsium arvense* et *bellis perennis*.

II. — *sur mull calcique sur sol brun* (parcs à « *orgeots* » à inondation légère) :

Comportement d'été aggravé par la présence du mull sec dès les

Fig. 6. — Végétation en sol exondé ; état en février ; on voit déjà cirses et renoncules sur bri à mull très mince, déjà craquelé.

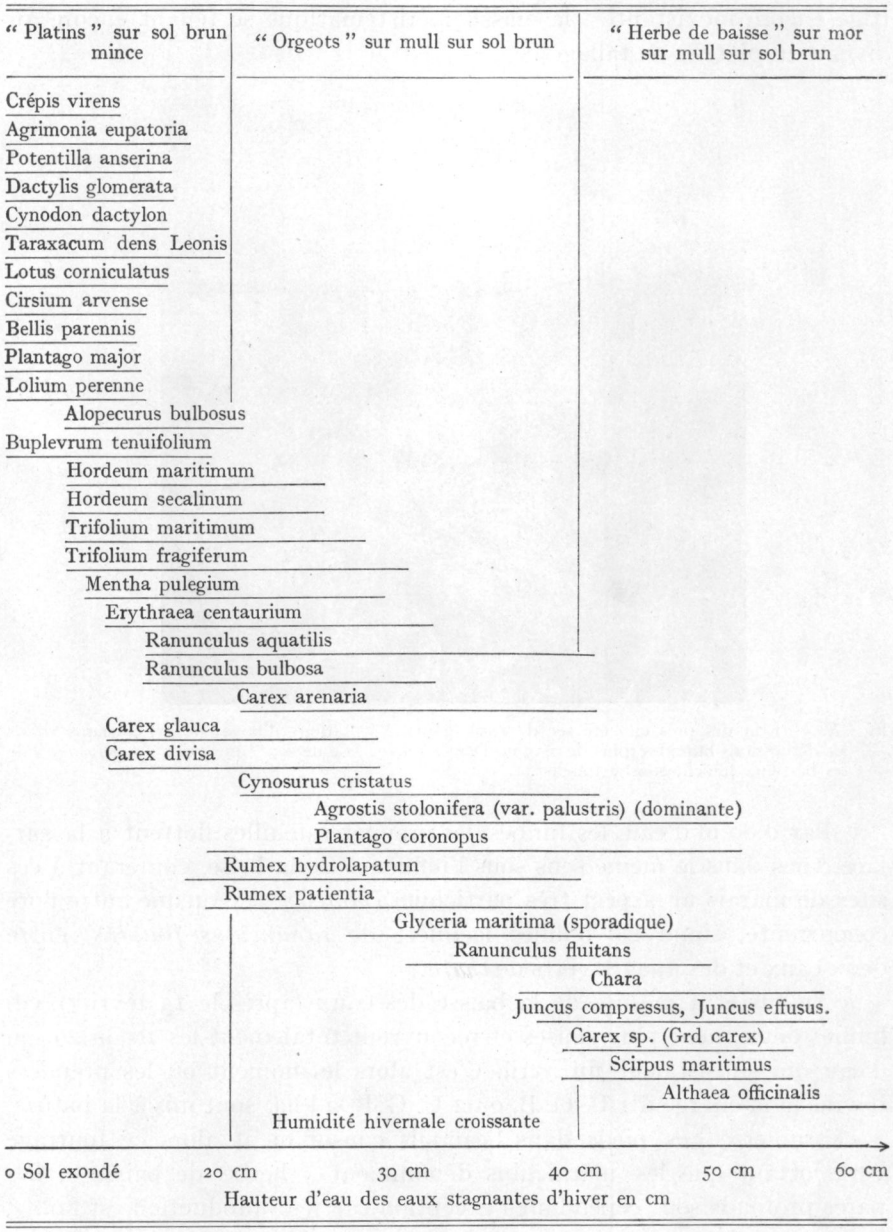
premières chaleurs : aspect de paillasson, végétation nulle l'été ; dès le retour des pluies, se développent surtout *hordeum maritium* et hordeum secaliorum (les « orgeots ») puis moins intensément *agrostis stolonifera, var. palustris* et *juncus effusus carex divisa, c. glauca, c. arenaria, ranunculus aquatilis, cynosurus cristatus*, tandis que germent divers trèfles dès que la température de l'eau devient suffisante : *trifolium fragiferum, tr. maritimum*.

III. — *sur mor-mull calcique sur sol brun* (parcs noyés à « herbe de baisse ». Désignation locale réservée à Glyceria maritima (espèce de paturin maritime).

Aucune végétation ne prend de tout l'automne ni de tout l'hiver, même sous l'eau.

Toute la flore utilisable ou adventice est en voie d'humification, sauf quelques graines, bulbes, rhizomes ou stolons que la sécheresse n'a pu réduire.

Evolution de la flore climacique des marais d'après l'amplitude biologique de quelques espèces Dénominations locales en Marais de Rochefort



Vers le 15 février, la t° de l'eau s'améliorant (t° > 15°C), se développent les limbes flottants de *glyceria maritima* dont nous avons relevé les mesures suivantes par 0,80 m d'eau :

1e feuille, taille 1,04 m gaine 0,43 m limbe 0,61 m
2e feuille, taille 0,76 m gaine 0,35 m limbe 0,41 m
3e feuille, taille 0,72 m gaine 0,16 m limbe 0,56 m
4e feuille, taille 0,14 m gaine 0 limbe 0,14 m

(tige encore inexistante : le massif méristématique se tenant encore au niveau du plateau de tallage).

FIG. A. — État des prés en l'été sec de 1959 (août). Végétation d'apparence luxuriante dans les dépressions humides (plus de 0,25 m d'eau en hiver). Ce ne sont que joncs (*J. effusus*) que les bestiaux foulent sans y toucher.

Par 0,80 m d'eau, les limbes des premières feuilles flottent à la surface, tous dans le même sens sous l'influence de la brise, conférant à ces sites de marais un aspect très particulier (voir fig. 7). Aucune autre flore concurrente, sinon les feuilles laciniées de *ranunculus fluitans*, entre deux eaux et des nuages verts de *chara*.

Au fur et à mesure de la baisse des eaux (après le 15 février), ces limbes deviennent plus denses et recouvrent totalement les 10 ou 20 cm d'eau qui subsistaient fin avril. C'est alors le moment où les premiers bovins (à la charge d'1 U. G. B. ou 2 U. G. B. à l'ha) sont mis à la pâture, à « ébrumer ». Les pieds dans l'eau, ils consomment alors ce fourrage vert flottant que les maraîchins dénomment « herbe de baisse ». Ces parcs profonds sont cependant l'exception car leur production est faible,

les joncs prédominant. Dans les parcs moins profonds, le même régime imposé par l'eau provoque le développement, non plus de *glyceria*

Fig. 7. — Aspect des limbes des feuilles de Glyceria dite « herbe de baisse » état au 15 fév. 1958 dans 0,60 m d'eau. Emergent seules les tiges de guimauve.

Fig. 8. — Aspect des orgeots à 0,20 m d'eau en avril, lorsque le vulpin bulbeux et les carex dominent encore.

maritima, mais d'*agrostis stolonifera var. palustris* ; dans l'un et l'autre cas, dès le retrait des eaux, la montaison de la tige et la floraison ultérieure rendent à ces glyceriae et agrostidae leur aspect coutumier

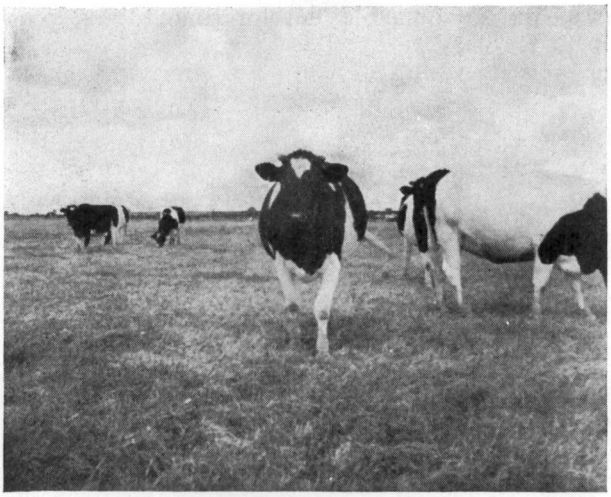


Fig. 9. — Agrostidae pacagée (en sept.) en sec — après une coupe en juin — en année normale seulement.

Fig. 10. — Après le retrait des eaux, état des parcelles dites « à herbe de baisse » en août.

Entre les pieds d'Althaea on voit le tapis de Glyceria (peu développé) et de Agrostis stolonifera (var. palustris) (beaucoup) que pâturent les bovins tout l'été, même lorsqu'ils sont secs (focage).

au-dessus d'un réseau touffu de *rhizomes* plus ou moins enterrés s'il s'agit de *glyceria maritima*, de *stolons* s'il s'agit d'*a. stolonifera var. palustris*. On fauche le foin de ces parcs en juillet, en concentrant le bétail sur les parcs à orgeots, puis on remet en pâture d'août à novembre.

Ainsi domine *l'Agrostidae*, à la fois sur les parcelles de type II et de type III lorsque la hauteur d'eau en hiver n'en étouffe pas les stolons d'une part, lorsque la compétition des plantes moins palustres ne l'étouffe pas d'autre part.

En définitive, tout se passe comme si la sélection *imposée par l'épaisseur de la couche d'eau* avait installé dans les bassins suffisamment inondés un écotype dominant *agrostis stolonifera* à forte production, tandis

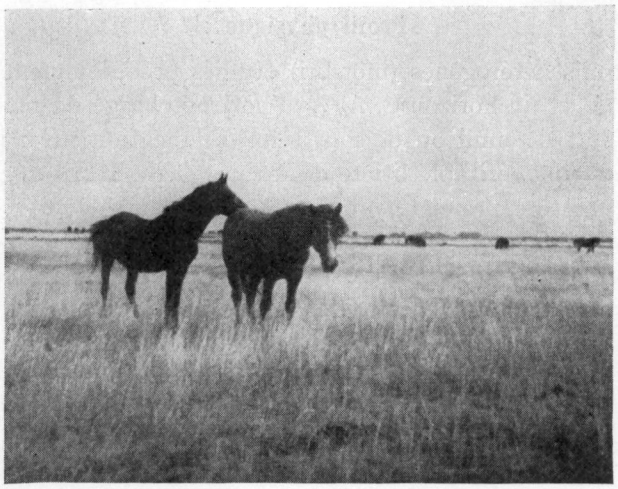


Fig. 11. — Orgeots sur mull sur bri (en septembre (vrai « focage »).

que subsisteraient, dans les parcs peu inondés, des écotypes de fourrages, souffrant à la fois de la compétition entre eux et de la faible évolution du milieu. Moins inondé, ce milieu est par ailleurs moins protégé contre les fortes gelées blanches des premières semaines du printemps (disparition des trèfles) par l'eau elle-même.

Conclusion :

On peut poser maintenant les deux questions suivantes :

Le comportement physique, chimique et biologique des sols alluviaux maritimes permet-il d'envisager des investissements et dans quelles limites, tant que la première amélioration foncière, le drainage, n'est qu'en partie réalisée?

Ou bien, une légère amélioration d'une flore climacique permettrait-

elle, en évitant tout investissement onéreux, de produire des unités fourragères d'un prix de revient compétitif?

Le chapitre suivant doit nous permettre de répondre à ces questions qui intéressent la productivité de tous les sols alluviaux maritimes à ce stade d'évolution. En Charente-Maritime seule, ils couvrent une superficie de 80 000 ha, soit environ le double d'un seul polder récent de l'Ijsselmeer (Pays-Bas).

B. — POTENTIEL DES SOLS ALLUVIAUX MARITIMES ANCIENS

Esquisse du potentiel de fertilité probable du « bri ».

I. — Potentiel physique :

Profil physique :

Les profils hétérogènes (mor-bri) étudiés précédemment présentent un horizon A_0 et un horizon C. A_0 est l'horizon chargé de matières organiques à l'état de mull ou de mor selon l'indication pH : il a jusqu'à 6 cm d'épaisseur, véritable litière de racines et de débris végétaux grossiers où la matière première provient principalement *d'agrostis stolonifera var. palustris* et de ses adventices (*althea officinalis*).

L'horizon C présente au-dessous, un aspect prismatique en masse compacte, gris ardoise, se couvrant, en se desséchant, de légères efflorescences salines. Seules, les racines puissantes des guimauves pénètrent la masse : la cassure présente de légères traces rouillées, indication d'un milieu en voie de gleyification ou de dégleyification saisonnière. Elle présente aussi des traces de petites coquilles ou coquillages minces en morceaux.

Vierges de toute façon superficielle, ces sols ne sont naturellement exploités par les racines que dans l'épaisseur de la zone de transit entre A et C, comme le montre l'importance du chevelu qui tapisse littéralement la surface du bri au contact du mull (zone H du profil A_0).

Ce profil physique A_0 C est donc très hétérogène, puisqu'il comporte trois horizons totalement différents, l'un de mor souvent parvenu à une forme inutilisable par dessiccations estivales, l'autre de mull, un troisième de bri totalement imperméable parce que sodique, s'il n'était crevassé parfois profondément par les mêmes sécheresses estivales. *L'homogénéisation de ce profil hétérogène va constituer le plus onéreux des stades de la mise en valeur.*

Pour l'exploiter mieux et plus intensivement, nous proposons trois moyens :

Assainir par abaissement artificiel du niveau de l'eau dans les émissaires d'aval, soit par pompage, soit par élargissement des vannes actuelles (voir fig. 12), seulement ouvertes lors des plus basses marées.

Plâtrer le bri ainsi assaini, pour obtenir le dessalage rapide par les eaux de pluies entraînant l'ion sodique dans les eaux de drainage ; encore faut-il qu'une certaine perméabilité soit née par le travail du sol et l'incorporation du mor tourbeux dans le bri fracassé.

Travailler le sol assaini, puis dessalé, l'aérer en se souvenant qu'en sol argileux, « labour vaut fumure » : ainsi les horizons à Gley, nocifs pour le système radiculaire des graminées [1] des prairies, régresseront. Cet axiome se vérifiera d'autant mieux que, jusqu'alors, les réserves de poten-

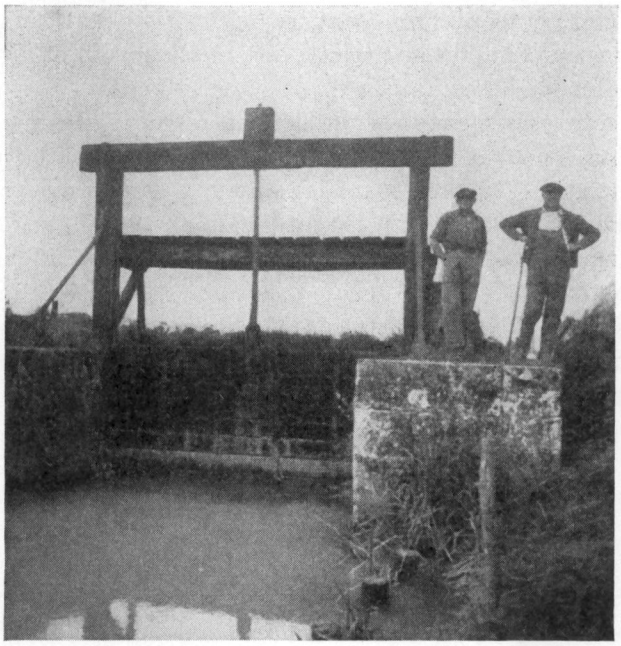


Fig. 12. — Les préposés aux vannes du Marais de Rochefort, maîtres incontestés du niveau des eaux, hélas! inconscients du comportement désastreux des sols inondés plusieurs mois, chaque année. On remarquera l'étroitesse de l'installation.

tiel chimique n'ont pu être exploitées superficiellement, *du fait de la mauvaise structure*, plus profondément, *du fait de la présence du Gley* : double défaut, heureusement passager mais très lent à réduire.

a) Propriétés physiques intrinsèques du bri charentais :

Grande *hétérogénéité* dans le faciès sauvage, justement dans l'épaisseur explorée par les racines. Quant à la *profondeur*, elle est inexploitable du fait de la présence d'un Gley réducteur. Si la texture argileuse est toujours une indication de résistance à la sécheresse, celle-ci ne peut être exploitée du fait de la mauvaise *structure*.

[1] Sauf la fétuque élevée et la fléole.

Ce sera le but de toute amélioration physique que de constituer de toutes pièces une structure qui permette la mise en culture et particulièrement le semis de petites graines.

L'adhérence du bri humide étant très grande, seul le labour d'été qui éclate les mottes sèches dans un milieu crevassé sous le mor, donnera de bons résultats : les *mottes éclatées* absorberont plus facilement les variations d'humidité et de température qui les réduiront. Le labour d'hiver en sols humides ne donnerait que des *mottes lissées* par le versoir et ensuite irréductibles.

Dans l'état actuel du profil sauvage, la *stabilité* dans l'eau est obtenue par le feutrage et l'importante végétation et d'agrostis et d'adventices, mais le profil reste discontinu.

Quant à la *perméabilité* du profil (voir dessin ci-contre), les limites que nos mesures nous ont fournies sur le terrain même, en période sèche, sont les suivantes (K représentant la hauteur d'eau en cm absorbée par le sol en une heure).

a) en marais de mor-mull calcique régulièrement inondé chaque année plusieurs mois et portant une *agrostidae*

(voir site 2b) K = 8 en surface, K = 10, à 13 cm. de profondeur.

b) en marais de mull calcique assaini échappant chaque année à l'inondation : *végétation d'orgeots* et *trêfle-fraise* (voir site 2 c) K = 48 à 60.

c) en marais de sol brun assaini et cultivé en *topinambour* ou en *jardin potager*, K = 200, tout au moins au début de l'opération.

En définitive, ceci prouve que les sols de bri peuvent acquérir une excellente perméabilité susceptible de réveiller tout leur profil utilisable dès que la structure aura été améliorée par le travail du sol rendu possible par un assainissement intégral (suppression de toute inondation).

Une fois l'amélioration de la structure amorcée, la végétation et les débris organiques qu'elle abandonnera, en profondeur par ses racines, en surface par ses tiges, ses collets, ses chaumes, feront le reste.

b) Propriétés physiques extrinsèques du bri :

1. *Rapports avec l'eau et avec l'air* :

A l'état de mor-mull calcique, le bri absorbe l'eau lentement lorsqu'il est inculte et 20 à 25 fois plus rapidement lorsqu'il est à l'état cultivé. Il la restitue aussi lentement : dans le premier cas (subclimax à agrostidae), il en restituera peu, puisqu'il en aura peu emmagasiné et l'on comprendra que la végétation ait, l'été, un aspect xérophyte.

Par contre, à l'état de sol brun, il en restituera davantage, à partir de réserves plus abondantes si sa perméabilité a été multipliée par 20, grâce à de patients travaux ; avec une perméabilité K = 200 (sol très fendillé et craquelé), les prés conserveront un aspect assez vert tout l'été : le contraste est très frappant (voir site 3 c).

D'après nos appréciations de la végétation dans les divers sites des Marais de Rochefort que nous avons étudiés depuis 1954, chaque année, il nous a semblé :

— qu'à la perméabilité K = 8 ou 10, correspondait une productiou prairiale valant 1 000 à 2 000 U. F. l'ha par l'agrostis, soit le coefficient 100 à 200 sur 3 mois 1/2 seulement si nous adoptons l'équivalence : coefficient 100 = 1 000 U. F. Ceci prouve l'étroite adaptation de l'agrostis à ce type de milieu si compact et humique.

— qu'à la perméabilité K = 48 à 60, correspondait une production valant 800 à 1 000 U. F. par les orgeots et autres, soit le cœfficient 80 à 100·

— qu'à la perméabilité = 200 correspondait une production valant plus de 5 000 U. F. par la fétuque des prés, soit le coefficient 500.

La restitution de la perméabilité à l'eau et à l'air, consécutive à l'amélioration de la structure sera donc capable, *à elle seule*, d'améliorer la productivité des sols de bri.

Tant que l'hétérogène profil sauvage ne sera pas travaillé, l'hétérogénéité du profil hydrique restera considérable.

En effet, aux environs de 40 p. 100 d'humidité, le mor sera déjà physiologiquement sec : il ne servira plus que de manteau protecteur contre la sécheresse aux racines qu'il recouvre comme le ferait un mulch naturel ; le bri sous-jacent ne deviendra une source profonde de fraîcheur qu'à la condition qu'il ait pu être aéré et pénétré par les eaux de pluie (1).

Là encore, cette hétérogénéité devra être réduite par les façons superficielles, raisonnées d'après l'épaisseur relative des horizons à mélanger.

2. *Rapports avec la température* :

Pour l'horizon C où se rencontre le bri proprement dit, ces rapports ne s'améliorent qu'avec la perméabilité. Si l'eau imprègne et traverse facilement le mor tourbeux A_0 qui recouvre le bri, les radiations solaires sont stoppées par ce manteau végétal et ligneux, isolant parfait. Si le mor est de couleur foncée et parfois presque noire, il ne peut pour autant capter les radiations solaires qui ne frappent que les tiges d'agrostis séchées par l'été et constituant un véritable tapis de traînasse.

Ainsi s'explique qu'avec toutes les apparentes possibilités d'un réchauffement rapide et bien que les eaux se retirent, en général, vers la fin d'avril, les Marais types de Rochefort sont des *pacages tardifs* où les animaux ne peuvent se sustenter qu'à partir de mai, et si l'on fauche la première pousse, à partir de juillet.

(1) Cf. Pédologie par Ph. DUCHAUFOUR.
De jeunes peupliers d'aspect de vitalité identiques, et cultivés en pots ont fané pour les valeurs suivantes :
Sol brun limoneux (6 p. 100 d'humus)..... 10 p. 100 d'eau.
Sol tourbeux (37 p. 100 d'humus)..... 37 p. 100 d'eau.
Tourbe (55 p. 100 d'humus)..... 43 p. 100 d'eau.

c) Amélioration des propriétés colloidales :

Le complexe argilo-humique compte pour près de 60 p. 100 dans les éléments physiques du bri.

L'indication pH = 6,4 à 6,8 au niveau A_0-C indiquerait une capacité d'échange facile à manœuvrer par la fumure minérale si elle n'était déjà envahie de cations alcalins, puis alcalino-terreux lorsque ce même pH passe à 7,4 ou 7,5 dès les premiers centimètres de bri à 0,20 m de profondeur.

Rappelons, à ce propos, l'hétérogénéité des niveaux pH. Nettement acide dans la litière de mor, il est neutre à 7 ou 8 cm de profondeur et nettement alcalin à 15 cm.

Au-delà de la neutralité, la *capacité totale d'échange* de ce sol est saturée d'ions Ca et Na. Nous pouvons donc écrire V = 100.

Ce caractère appelle donc un second assainissement chimique celui-là concomitant à l'assainissement physique, *avant de conseiller l'emploi de tout engrais chimique* : en emploiera de 2 à 4 t de plâtre à l'hectare après passage du rotavator ou du covercrop lourd, dilacérateurs du tapis végétal.

Puis, dès qu'une certaine amélioration de la structure sera obtenue, on donnera, *durant quelques années*, la préférence au superphosphate sur les scories : les 45 à 50 p. 100 de plâtre qu'apporte cet engrais poursuivront l'effet commencé. Cependant, ils seront lents à paraître tant le milieu est complexe et mal structuré au départ, tant est grande aussi sa *résistance physique* (adhérence, compacité et pouvoir tampon correspondant) *au drainage*.

II. — Potentiel chimique :

Même hétérogénéité dans le profil chimique.

Si nous suivons Huriez (1) dans ses analyses du Marais de Genouillé (étudié superficiellement d'abord, à 0,40 m de profondeur ensuite), nous trouvons un début d'évolution aussi bien dans le profil physique que chimique, profondeur au-delà de laquelle la composition reste à peu près constante.

Voici ces analyses :

	Surface de 0 à 0,15 m	Profondeur à 0,40 m
Analyse physique p. 1 000		
Sable grossier	0,6	0,1
Sable fin	5,2	12,5
Limon	32,3	28,2
Argile	*46,4*	*56,4*
Chaux (en CO_3Ca)	1,3	1,0
Matières organiques	*14,2*	*1,9*
pH	6	7,4

(1) Voir analyses chimiques. Problèmes posés par le sodium et le chlore dans les Marais charentais (La culture fourragère — D. S. A. de la Charente-Maritime 1957).

	Surface de 0 à 0,15 m	Profondeur à 0,40 m
Analyse chimique p. 1 000	—	—
Azote	*6,5*	*1,0*
Acide phosphorique assim.	0,17	0,22
Potasse assimilable	0,52	0,88
Sodium échangeable	1,14	2,22
Chlore	1,07	1,84

La présence de sodium échangeable *confère à l'argile une structure défloculée qui se révèle le second obstacle à la mise en culture.* Le gonflement de cette argile en période humide, son état sodique, explique la faible évolution sous un climat cependant pluvieux : 682 mm (moyenne 1891-1930) et à pluviosité dominant surtout dans les mois froids à faible évaporation (oct. à déc.). Comme le montre le graphique 3 ci-dessus le profil évolué n'a que quelques centimètres d'épaisseur sans A_0.

Le potentiel chimique de ces terres de bri serait donc élevé, avec grande disponibilité en potasse et en matières organiques, en chaux, en fer et en soufre (voir formation des vases marines), mais devrait être enrichi en acide phosphorique (pauvreté pédogénétique des alluviaux de cette nature).

Comportement présumé des sols alluviaux vis à vis des fumures minérales :

Avant toute décision de refonte de vastes périmètres d'alluviaux du type du site IV, les plus anciens, on doit cependant se demander comment le milieu réagira aux fumures minérales à venir, étant donnée sa composition chimique et le pH probable après la mise en culture.

Voyons successivement les éléments principaux : P_2O_5 et K_2O :

a) *L'acide phosphorique.*

Malgré le pH moyen de 6,8 de ces sols jeunes et leur teneur en Ca échangeable, P_2O_5 devra être apporté sous la forme qui fournit en même temps le plâtre nécessaire à l'assainissement sodique du milieu : on emploiera donc le superphosphate, mais à des doses suffisantes, dès le début, pour obtenir une incorporation rapide et homogène dans tout l'horizon arable. Ce sera, typiquement, ce qu'on entend par une fumure de fond.

On devra se souvenir également que le mor n'a pas beaucoup d'efficacité pour libérer le phosphore sous une forme soluble. Le mull ici en faible proportion serait beaucoup plus efficace : il s'agit donc de le développer à partir du mor inerte.

Ces supers seront épandus différemment selon le stade cultural atteint : en *couverture* sur les prairies subclimax, dès la fin du retrait des dernières eaux au printemps. La matière organique véhiculera l'acide phosphorique jusqu'au contact des radicelles.

par enfouissement, incorporation à la couche arable dans le cas de mise en culture réelle. On se souviendra cependant que les racines des graminées des prairies restent, en général, très superficielles : on ne pratiquera pas d'enfouissement profond.

Mais la présence du *fer* sous les diverses formes reconnues au cours de l'étude pédologique préalable risque-t-elle de créer des formes insolubles de complexes ferro-phosphoriques? Nous répondons par la négative. Il faudrait, pour craindre cette insolubilisation, que le pH soit faible. Or, l'extrême présenté par les analyses correspond à pH = 6,2 pour un horizon superficiel comportant encore 3,55 p. 100 de CaO échangeable. Dans les horizons plus profonds, le fer favorisera l'élimination du calcaire et l'assouplissement du milieu, étant donnée aussi son action favorable sur la structure.

Ce ne sont donc pas des milieux où la présence de Fe soit dangereuse pour l'anion phosphorique, mais comment évoluera-t-elle?

Dès que la structure sera améliorée et le sol moins compact, l'aération de la couche arable permettra, grâce à l'acide carbonique fourni par les fermentations, la formation de bicarbonates d'une part et l'oxydation des sulfures primitifs tels que le sulfure de fer d'autre part : naîtront des sulfates qui, avec le calcium échangeable, donneront des sulfates de chaux solubles dans l'eau et des oxydes ferriques. Le sol de bri perdra sa couleur noire et tendra vers le gris.

Après avoir réduit l'élément sodium, funeste à la structure, c'est plutôt à la présence d'un excès de *magnésie* échangeable dans les sols alluviaux que devra s'attaquer l'agriculteur en utilisant des engrais calciques dont la chaux entraînera une substitution du calcium au magnésium et l'élimination de celui-ci dans les eaux de drainage. Cependant, cette précaution ne sera pas indispensable : évalué en MgO, rappelons que DEMOLON et BASTISSE ont noté à Versailles en cases cultivées en sols de limons, une exportation annuelle de magnésie évaluée à 23,3 kg par ha, ce qui prouve bien que l'élimination spontanée de la magnésie est possible et qu'elle se fera d'elle-même, sans apport de chaux pour peu que la perméabilité du bri ait été améliorée par les opérations précédentes : cependant cette élimination sera lente du fait de la compacité du bri où les mouvements de l'eau sont pratiquement nuls.

b) *La potasse.*

En effet, contenir de 3 à 10 fois plus de magnésie échangeable que de potasse (en m. éq.) est caractéristique de ces sols alluviaux. On a observé, d'après les travaux de BEAR et SMITH, que le rapport Mg/K devait s'établir entre 3 et 4 pour que ces éléments soient correctement assimilés par les plantes.

Enfin, dès les premiers labours, il est probable que l'action de la

potasse diminuera du fait que davantage de calcaire aura été réintroduit dans le profil : ce sera la manifestation de l'antagonisme Ca - K qui survient souvent lorsqu'il n'est pas contrecarré par un meilleur approvisionnement en *humus jeune*. Il en serait de même pour l'antagonisme Ca - Fe dans le cas où croîtraient des plantes sensibles à la chlorose. Une amélioration de la teneur en mat organique est indispensable : on ne doit donc *jamais diluer trop celle du profil*.

c) *La magnésie.*

On considérera également le rapport Mg/Ca : il varie selon les échantillons, entre 0,30 et 0,51. Comme ce rapport croît dans la plante comme il croît dans le sol, on évitera de le faire tendre vers 1, seuil des accidents de toxicité. On rejettera donc tout engrais susceptible d'apporter de la *magnésie* : un excès de Mg s'opposerait, en effet, à l'absorption de K par les végétaux, tout comme le ferait une carence de Mg. *Après la dessalure* qui aura réduit la teneur en sodium et sensiblement amélioré la structure des argiles, *après le drainage* que cette meilleure structure accélèrera, la teneur en magnésie diminuera à son tour : la capacité totale d'échange des bris, en partie désaturée, se révélera plus souple et l'action des fumures minérales plus efficace ; nous aurons obtenu le *sol chimiquement actif* décelé par un pH inférieur, plus proche de 6,4-6,8 que de 7,2-7,5.

Mais plusieurs années seront nécessaires pour y parvenir. Encore faudra-t-il aider la nature par *l'enfouissement d'engrais verts*, de chaumes, de fumiers, de pailles ou de gazons de vieilles prairies dégageant beaucoup de Co_2 pendant leur humification à condition qu'elle reste aérobie. Leur généralisation entraînera l'apparition de microorganismes plus nombreux, de vers de terre, de larves et d'insectes qui fabriqueront des composés organiques dont le rôle de liant entre les éléments les plus fins du sol est bien connu *(Véreau)*.

En bref, les fumures minérales porteront, au début, *uniquement* sur *l'acide phosphorique* sous forme de super tant qu'il restera autant de sodium indésirable, puis de phosphates bicalciques. Partout où leur action sur la flore ne paraîtra pas suffisante, on recourra aux *amendements physiologiques* par épandages soit de purins, soit de lisiers, soit de fumier décomposé ou de mulchings amenés d'ailleurs, en fin de pâture. Peut-être, P_2O_5 attend-il simplement que le dégagement de gaz carbonique des matières ainsi apportées le mobilise en accroissant sa solubilité dans les solutions du sol ; peut-être attend-il aussi d'être protégé contre la rétrogradation par une plus heureuse distribution (adsorption sur les humates calciques).

La fumure potassique restera inutile tant que la richesse des échantillons se maintiendra entre 0,60 et 0,88 de K_2O assimilable : c'est par

le travail du sol et son enrichissement en matière organique que son aptitude à régénérer la potasse s'améliorera.

c) Quant à *l'azote*, il servira en début de printemps de *leurre* pour développer précocement la végétation bien avant que ne s'établisse la nitrification, toujours tardive, des réserves organiques de ces milieux encore éteints.

Conclusion :

Un pH trop élevé, signe d'une capacité d'échange saturée de Ca, Mg, K, Na, indique des *sols engourdis* : les échanges ioniques s'y font mal. La matière organique elle-même, base de toute activité microbienne et de toute fertilité productive se trouve, ou bien *localisée* à *l'état de mor tourbeux* (pH = 6,4) dans l'horizon supérieur Ao, le plus vulnérable aux coups de la sécheresse, ou bien *paralysée à l'état de mull calcique* (pH = 6,8 à 7,4) résistant aux fermentations microbiennes en présence de pareilles teneurs en argile (50 à 60 p. 100).

Plus bas encore, *la proximité du gley* (décelable au dégagement d'hydrogène sulfuré sous l'influence de l'acide chlorhydrique dilué) ralentit sa minéralisation par *excès d'anaérobiose*.

Le réveil du potentiel chimique suivra lentement l'amélioration de la structure grâce au labour et à l'incorporation étroite, dans la couche arable, du mélange du mor et du mull (selon le type pédologique ou le niveau) avec le mulching de la végétation dilacérée en place. Le rapport C/N du mull ou du mor tourbeux se trouvera abaissé par le mélange avec ce mulching frais, plus riche en protéines tel que l'enterrera superficiellement le *rotavator*, ou le covercrop lourd, puis la *charrue*. Au contact des réserves minérales jusqu'alors inemployées, les acides humiques nés de la décomposition faiblement aérobie des végétaux et du tapis végétal Ao, trouveront suffisamment de bases pour former des humates stables, si nécessaires à la constitution, pour un temps, d'une structure grumeleuse résistant à l'action des pluies. Dès l'enfouissement de la couverture végétale, deux passages croisés de crosskill devront éviter toute dessiccation en profondeur en rappuyant fermement le mottis.

La réalisation du plus grand nombre de grumeaux sera seule capable d'entraîner la rapide amélioration de la structure, *à la condition expresse que le bri échappe dorénavent aux inondations saisonnières, même de courte durée*. Cette amélioration précédera une meilleure nutrition des plantes, tandis que l'abaissement progressif du pH jusqu'à 6,7 ou 6,8 facilitera la régénération des ions phosphoriques et potassiques consécutive aux migrations des acides humiques jeunes à travers le profil entier. Se remettront également en solution quelques oligo-éléments (Mn, Mo, Zn, etc) pour leur plus grande partie actuellement insolubilisés.

III. — Potentiel biologique :

Il est intéressant de constater à quel point un tel milieu pourtant né d'actions biologiques successives sur les littoraux marins, a pu être éteint et stérilisé, sauf peut-être en superficie, par la disparition progressive de toute structure c'est-à-dire de toute aération et, une partie de l'année, de toute humidité, alors que l'air et l'eau restent les bases de la vie microbienne, aérobie.

Prenons, par exemple, le site III périodiquement inondé : si quelques colonies d'insectes s'y étaient installées pendant l'été, l'eau les noie rapidement, tandis que les larves, vers, explorant et aérant le sol sont asphyxiés. Si, au cours de l'inondation, quelque colonie d'une famille aquatique s'installe, la sécheresse marquée de l'été ne tardera pas à l'évincer.

Il reste une preuve de cette lutte pour la vie des colonies d'été qui cherchent à résister à l'inondation tant qu'elle reste faible. Ce sont les parcelles du site IIIc à orgeots, sol à mull calcique, qui en portent les traces sous la forme de petites buttes extrêmement solides dénommées *beurlins* ou *truchines* ou *mottons*, petits tumulus de détritus végétaux de toute sorte accumulés par les fourmis au fur et à mesure qu'elles placent leur couvain, hors l'ombre portée des graminées, en position surélevée et à l'abri d'une pellicule de terre noire pour les faire couver par la chaleur solaire.

Ces mottes en forme de calottes de 30 à 40 cm de diamètre et de 5 à 15 cm de hauteur peuvent être rasées par éclatement grâce à l'emploi d'un rouleau pesant plusieurs tonnes, en pierre massive. Ce rouleau s'emploie exclusivement au moment où ces mottes sont inondées, lorsqu'un bain déjà prolongé les a ramollies : au passage du rouleau tracté dans l'eau par un tracteur, la motte explose horizontalement dans tous les sens, laissant à sa place une trace circulaire de bri dénudé.

Il convenait de signaler ce procédé efficace dans les marais au stade pédologique du mull calcique à végétation subclimacique dominée par *hordeum* (orgeots). On en trouve également dans les parcs à agrostis (mor sur mull).

IV. — Conclusion :

De l'esquisse du potentiel de fertilité des alluviaux les plus anciens (bri dans leur site charentais), se dégage l'impression d'un milieu assez riche, bien doté physiquement (pouvoir tampon) et chimiquement (sauf peut-être en acide phosphorique) et qui *n'entre pas en « fertilité »* parce qu'il souffre :

— Physiquement, d'une mauvaise structure entraînant *asphyxie.*

— Chimiquement, d'un excès de certains cations entraînant juste-

ment cette *mauvaise structure* (Na, Mg) et une *certaine inertie*, apparentée au niveau élevé du pH du mull calcique dont la capacité d'échange est saturée de Ca et de Na.

Plusieurs années d'expérimentation et d'observation ont amené les Services Agricoles de la Charente-Maritime (op. cit.) aux conclusions suivantes, en matière de mise en valeur des vieux prés de marais, supposés assainis (ce qui n'est pas encore le cas dans le secteur à agrostidae) :

a) le gazon ancien doit être déchiqueté avant d'être enfoui.

b) le plâtre a une action très favorable sur la structure superficielle.

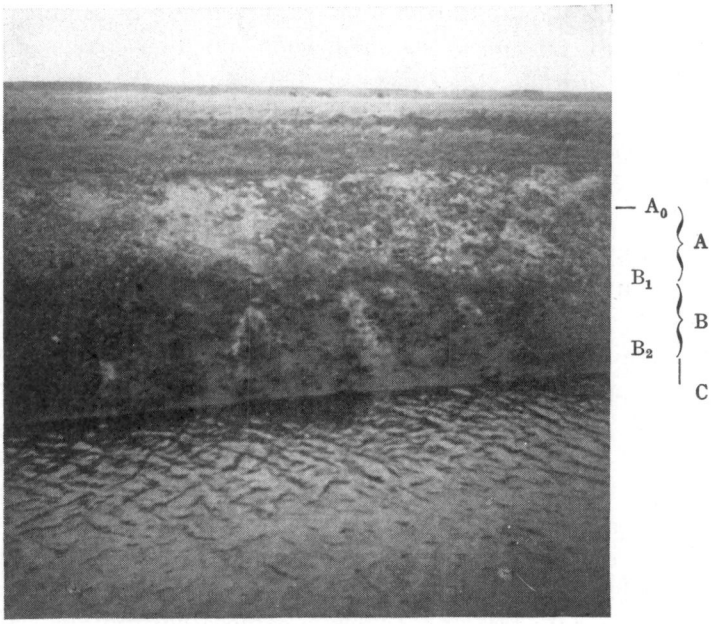


Fig. 13. — Sols podzoliques des Marschen (Sleswig-Holstein) auxquels les autochtones préfèrent les koog récupérés à grands frais sur la mer (sols neufs).

c) l'eau stagnante a un effet désastreux en hiver.

d) les taupins des vieilles prairies sont funestes aux nouvelles s'ils ne sont pas détruits préalablement.

e) le *gel hivernal est insuffisant* pour réduire les mottes : on doit donc labourer plutôt en été. On attendra patiemment, grâce aux cultures-pionniers, que la structure se soit affinée, avant d'entreprendre les resemis avec les variétés de graminées et de légumineuses qui commencent à faire leurs preuves (fétuque des prés ou fétuque élevée et trèfle blanc). Une production triple sera la récompense des persévérants après 2 *ou* 3 *années.* »

Tels sont les alluviaux maritimes récents dans leur site cependant le

plus dégradé par la présence du mor. Nantis d'un complexe important, saturés d'éléments minéraux s'opposant encore aux fumures minérales, ils souffrent *d'excès* dans les domaines physiques et chimiques parce que depuis des siècles les responsables de leur assainissement général n'ont songé qu'au drainage alors qu'il fallait préalablement réaliser un nivellement topographique qui mette tous ces marais à l'abri définitif du retour de l'eau. Les pays d'Europe où ces mêmes alluviaux constituent actuellement des sols très fertiles sont justement ceux où les mêmes responsables n'ont pas laissé l'*eau douce* dégrader par ses excès ces supports équilibrés qu'avait déposés l'*eau de mer*.

Ils sont à l'opposé des sols podzoliques dépouillés du principal de leur complexe et de la plus grande partie de leur stock minéral utilisable par les plantes : ceux-là souffrent de *carences*.

En parcourant les « Marschen » du Sleswig-Holstein, on comprend bien, à voir les mornes podzols des plaines intérieures (fig. 13) que les autochtones aient préféré conquérir patiemment sur la mer le « waddeneiland » qui s'étend à l'abri des « îles de gué » de la Frise, troquant ainsi des milieux climatiquement usés valant 80 à 100 000 Fr l'ha, contre des terres neuves qui exigent, cependant, en une dizaine d'années, 1 500 000 Fr par hectare d'investissements à long terme.

TROISIÈME PARTIE

AGRONOMIE

MÉTHODES DE MISE EN VALEUR DES ALLUVIAUX MARITIMES (opérations-types)

A. PREMIÈRE ÉTAPE :

Captage des lais et relais de mer en Frise.

Site étudié : Site I. — Hauts fonds situés en Mer du Nord entre les îles frisonnes et le littoral allemand au nord, néerlandais plus au sud. Alluvial au stade récent, non évolué = sol azonal puisqu'il vient de ressurgir des eaux.

Définition : La désignation très répandue en Slesvig-Holstein de « Koog » distingue les terres cultivables prises à la mer par le piégeage des vases, de celles dénommées « polders » qu'on a entourées d'une digue en pleine eau et qu'on a asséchées ensuite par pompage d'une nappe de 4 à 5 m d'épaisseur.

Mode opératoire : Voici l'ordre dans lequel se succèdent les opérations

reprises pour la construction d'un koog à partir des dépôts de vases marines :

1. Fig. 14, construction d'épis en rondins, battus dans la vase à marée basse et servant ensuite de chemin de service (2 rangées de pilots légers entre lesquels sont enfouis des fascines et des fagots de feuillus). De ces épis en partent d'autres, perpendiculaires, créant ensemble des bassins de 800 m de long et de 400 m de large, correspondant entre eux et avec la mer par de larges baies.

A marée montante, ces enclos sont envahis d'eau boueuse qui, du

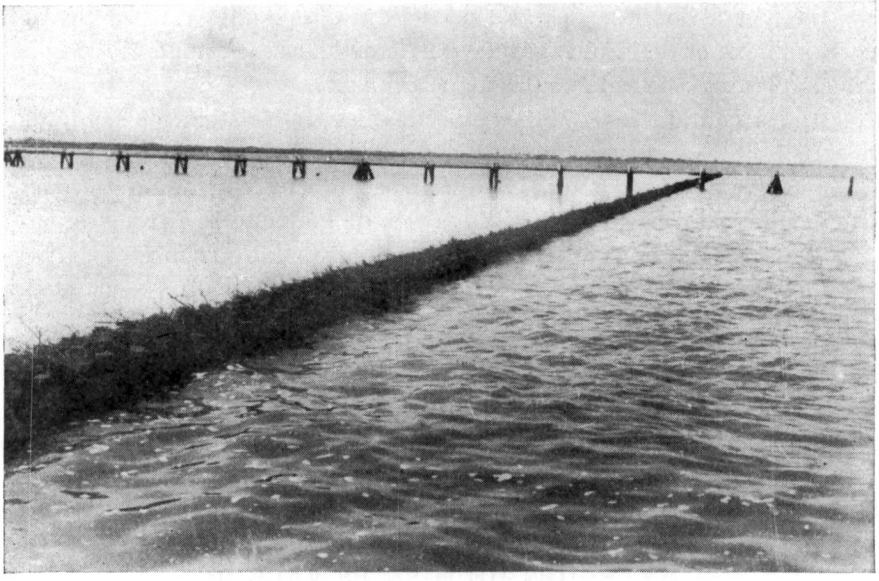


Fig. 14. — Un des aspects des chantiers de piégeage tout au début de leur implantation : 10 ans de travail en perspective et 1 500 000 f. d'investissements prévus par lecture à récupérer sur la mer. Au 2e plan passerelle de service pour la construction de diguettes.

fait de l'absence de vagues, dépose son film sur les dépôts antérieurs et ainsi de suite. Lentement, le dépôt s'élève.

Lorsqu'il a atteint un certain niveau, on creuse, à la drague mécanique, en période de basses eaux et sous l'eau elle-même, des fossés de 1 à 3 m de largeur, espacés de 10 m entre eux, tandis que leur profondeur n'est que de 0,25 à 0,50 m. Ce sont de nouveaux *pièges à vases* : en effet, tandis que la vase de ces fossés est rejetée sur leurs bords et émerge dès lors, au-dessus des eaux les plus hautes, de nouvelles boues envahissent avec le reflux, par temps houleux, ces petits fossés et finissent par les colmater.

Le paysage prend, dès lors, la physionomie ci-contre (voir fig. 15).

Ainsi, s'exhaussant progressivement, ces vastes périmètres restent

secs, à marée haute, pendant des laps de temps de plus en plus longs. C'est alors l'envahissement par l'*aster tripolium* dont les semences, amenées d'autres atterrissements, couvrent alors les rivages, en automne.

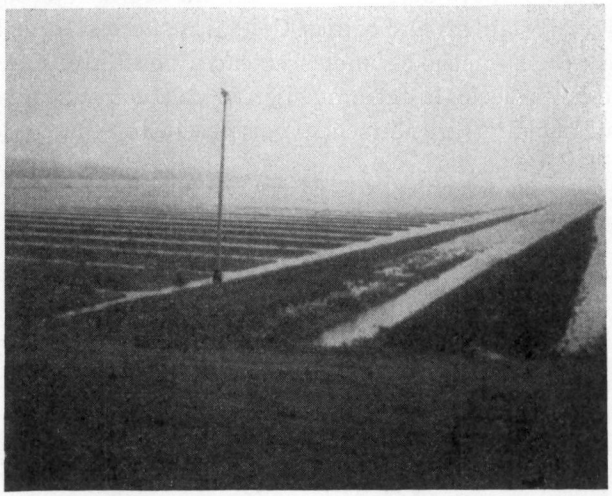


Fig. 15. — En Frise : aspect des koog après la 5e ou 6e année.

Les sols continuant à prendre de la maturité et à perdre leur salinité, sont envahis par une dernière graminée halophile, *glyceria maritima* qui

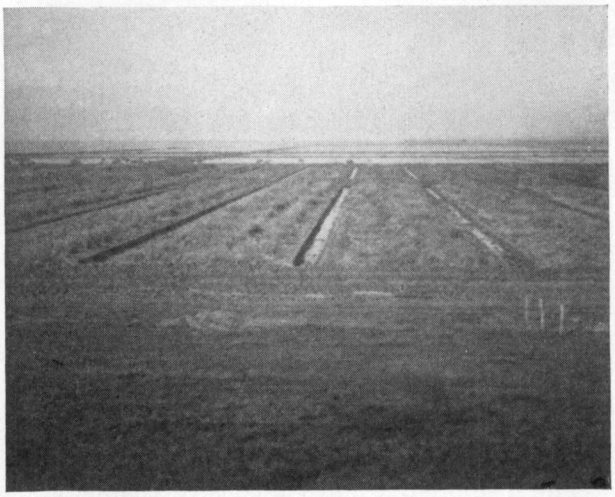


Fig. 16. — 10e année lorsque les misottes font place au ray-grass et à la fléole.

fournit, en Allemagne, le premier pacage aux bovins anémiés par la longue stabulation entravée hivernale, de rigueur sous ce climat. Aux Pays-Bas, seuls pacagent les moutons de race Texel.

Ensuite, vers la 10e année, sera construite à la limite des nouveaux piégeages, une digue de section trapézoïdale de 60 m de base, de 3 m de largeur au faite et de 6,50 à 7 m de hauteur.

Dès lors, les pacages de *glyceria* seront transformés en lotissements, les uns cultivés, les autres en prairies. Ces gains successifs sur la mer, ont commencé avec des méthodes moins efficaces peut-être, mais déjà rentables dès le XVe siècle, la terre ainsi créée valant mieux que les dépôts du diluvium glaciaire des Marschen voisines où dominent les podzols.

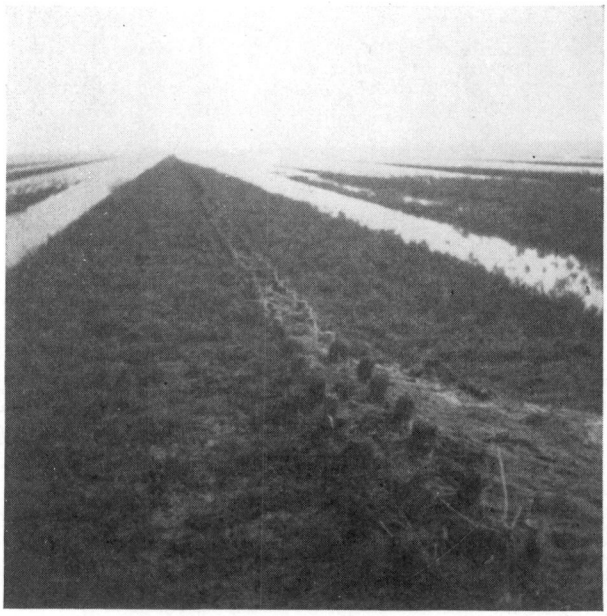


FIG. 17 — État des chantiers à la 5e ou 6e année.
La double rangée de rondins reste apparente pacage à Glycéria masitima.

Productivité obtenue pour le type alluvial le moins évolué (sol naissant).

a) au stade de *glyceria maritima* (misottes) en site I et II, le pacage d'un ha alimente environ 4 brebis Texel et 4 agneaux, soit une production de coefficient 80 à 90 si nous adoptons pour coefficient 100 la valeur de 1 000 U. F. ; en fonction du prix du loyer et des charges à l'ha, le prix de revient de l'U. F. en pâture ressort à un prix voisin de 5 Fr.

b) au stade ultérieur de l'*envahissement naturel par les graminées des prairies*, tel qu'il se produit après la construction de la digue de protection, l'ha porte de 3 à 3,5 bovins qui gagnent 150 kg de viande en six mois, pour une redevance de l'ordre de 20 000 Fr. Ceci correspond à une production de coefficient 420 *à* 490, mettant l'unité fourragère au prix de 4 à 4 Frs 75.

c) ensuite, une fois la digue consolidée par le temps, ces terres à

vocation prairiale cependant, sont mises en culture et produisent de 40 à 50 quintaux de céréales, soit avec la paille, l'équivalent de 5 à 6 200 U. F. par ha, qui correspondent à un coefficient 500 à 620.

L'inconvénient de l'imperméabilité que présente en France le « bri » est ici assez rare : artificiellement déposé sur des schorres sableux, le bri frison se trouve drainé automatiquement et donne un support productif parce qu'il n'est plus jamais inondé (sauf accidents survenant aux digues lors des marées d'équinoxe).

Dans le cas où la proportion d'argile est trop forte quand on passe à la culture intensive, il est souvent possible de remonter par la charrue une partie du sable du schorre dans le slikke artificiellement piégé et consolidé : l'exploitant a ainsi la ressource de doser à son gré le complexe argilo-humique de son sol, grâce à des labours d'homogénéisation, classiques en matière de mise en valeurs d'alluviaux toujours hétérogènes. Ces travaux succèdent alors sans délai à l'endiguement.

Si, en quelques années, une fertilité de ce niveau à pu être obtenue, il faut en voir la genèse dans le fait que, depuis leur émergence, ces alluviaux maritimes n'ont jamais été abandonnés à eux-mêmes à l'issue d'un unique tracé de fossés d'écoulement.

Soumis à drainage en vue de leur réoxydation profonde, labourés plus ou moins profondément selon le niveau sableux ou argileux recherché pour alléger ou alourdir leur complexe, envahis de graminées à grand pouvoir d'évaporation et d'amélioration de la structure, ces dépôts marins accélérés n'ont pu subir d'évolution climatique dégradante, comme celle que nous déplorons dans nos marais charentais.

En particulier, l'absence d'eaux stagnantes a évité toute apparition de mor tourbeux comme tout développement du Gley, facteur d'avilissement de la fertilité naturelle.

A la lecture des étapes suivantes engagées après des siècles d'abandon, puisque les formations des syndicats d'usagers remontent au XVIIe siècle seulement, on mesurera quelle est la dégradation relative du milieu dit « bri ». Les principaux facteurs en ont été la *soude* et le *mor*. La soude s'est maintenue dans le profil utilisable, par suite de l'insuffisance des drainages. Le mor tourbeux s'est développé par suite du retour trop fréquent des inondations.

Il en reste un enseignement : les alluviaux maritimes doivent être traités physiquement et chimiquement sans délai autre que celui permettant d'y pénétrer, dès que le riverain est assuré de n'y plus voir revenir le flux.

B. — DEUXIÈME ÉTAPE

Exploitation des marais de Rochefort en Aunis.

Site étudié : Site IIIa correspondant à un mor sur mull calcique sur sol brun recouvrant un gley (partie inondable 3 mois par an).

Production atteinte sur un ha du type le plus évolué (*agrostidae*) : La flore est composée, comme nous l'avons vu, à ce stade pédologique, de *glyceria maritima* et surtout d'*a. stolonifera, var. palustris,* envahie par endroit de guimauve (*althea officinalis*) et de plantain (*p. coronopus*), adventices.

FIG. B. — Etat de la végétation spontanée pacagée quelques. mois par 1,3 U. G. B à l'ha. Majorité de mauvaises herbes, guimauves et iris. Peut être 1 200 UF/ha.

Ces prés-marais fournissent actuellement en 200 ou 230 jours de pacage, une production de *coefficient* 200 si nous posons que 100 correspond à 1 000UF (voir fig. B).

Comme les charges s'élèvent à 20 000 Frs l'ha, le prix de revient de l'U. F. est d'environ 10 *Fr* en année favorable. Ce prix peut remonter au-dessus de 15 Fr en année défavorable, réduisant les délais de pâture. Dans ce cas, le cheptel pâture à des prix de revient désastreux : si les exploitants, à cheval sur le plateau et le marais, conservent cependant ces « prises » de 15 à 25 ha qui s'ajoutent à leurs superficies labourées (30 à 50 ha), c'est bien qu'ils espèrent toujours en des saisons favorables.

Mais on conçoit qu'avec pareil régime, ils ne soient jamais en mesure d'investir les travaux d'un programme d'amélioration à moyen terme.

Les prés de marais ainsi envahis de *glyceria maritima* et d'*a. stolonifera* constituent bien un sub climax rigide qui ne peut offrir une forme d'exploitation rentable que durant les campagnes où il se trouve lui-même favorisé par le climat.

Pour atteindre à une plus haute productivité, ces mêmes prés de terres fortes exigeront la manière forte. « L'effort d'entame » que devront fournir les défricheurs sera cependant contrecarré chaque fois qu'une erreur se sera introduite dans la logique des opérations successives.

Avant de stocker dans la maison de la plante des éléments minéraux à elle destinés, cette maison devra être assainie (drainée) puis aérée (régression du gley) puis débarrassée des éléments contraires (soude, magnésie, calcaire) jusqu'à un assouplissement suffisant de sa capacité totale d'échange : alors seulement pourront intervenir efficacement les fumures minérales.

C. — TROISIEME ÉTAPE

Exploitation d'un ancien climax d'abord assaini complètement, ensuite soumis à l'ordre logique des opérations culturales.

Site étudié : Site IV : Marais de Saint-Augustin, Ferme du Breuil (marais hors d'eau depuis de nombreuses années).

Une fois le milieu assaini, on a cherché à mélanger les horizons de mor, de mull et de bri (A_0, A et C) en incorporant de grandes quantités de travail et de force motrice pour venir à bout de la mauvaise structure et de l'hétérogénéité du milieu.

On a ainsi aéré le sol et mis en route la nitrification partielle des réserves grâce à l'introduction de cultures viables en sol motteux, c'est-à-dire de *maïs-fourrage* se succèdant à lui-même plusieurs années : l'hétérogénéité de la couche arable due à la présence de plaques de mor tourbeux à l'état d'amadou irrécupérable a bien provoqué, au début, certaines lacunes sans végétation suffisante mais, avec l'aide des façons d'été, des variations atmosphériques et surtout l'action physique des systèmes radiculaires du maïs ou des adventices intervenues, la structure assez fine favorable à l'ensemencement des prairies de graminées a fini par s'établir. (En pareil cas, on eût pu obtenir des résultats plus rapides en semant 30 à 35 kg de ray-grass d'Italie dont les racines ont, sur les mottes de bri, un pouvoir dissociant considérable : on obtient, en moyenne, 3 000 U. F. sans travaux autres que rotavator avant labour de défriche).

Quel a été, approximativement, le *prix de revient de l'U. F. ainsi produite* :

1re *année* : D'une récente publication de la Direction des Services

Agricoles de la Charente-Maritime (1), la première année de culture de préparation sur marais revient à 95 250 francs pour une production approximative de céréales d'hiver de 75 à 85 000 francs, soit à la charge des prairies ensemencées plus tard : 15 000 francs de premiers frais d'établis sement (voir fig. C).

2e *année* : Ces cultures se renouvelant une deuxième année, qu'il s'agisse de blé d'hiver ou de maïs-fourrage, nous observons à nouveau des frais supérieurs à la recette obtenue, soit à nouveau 15 000 francs à porter à la charge de la première prairie temporaire, pour 6 ans par exemple.

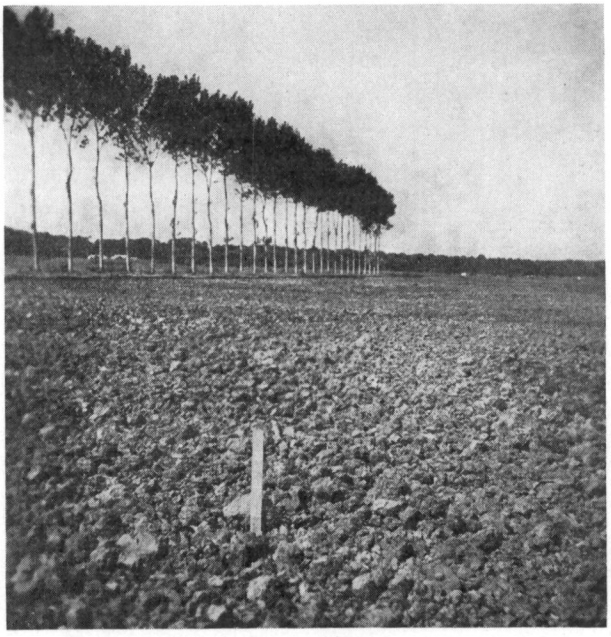


FIG. C. — État des labours de défriche de prés sauvages assainis, après passages des crosskills, cultivateurs, herses chargés de réduire les mottes. Affinées par les pluies d'automne, ces pièces seront ensemencées en fétuque des prés à ce moment (aspect en fin août 1958).

3e *année* : Cet établissement revient (d'après les Services Agricoles de la Charente-Maritime) :

a) travaux du sol	20 000 Fr	soit 50 000 Fr
b) fumure de fond ...	20 000 Fr	
c) semences	10 000 Fr	
Frais annuels :		
location (450 l de lait).	11 250 Fr	
fumure azotée (400 kg ammonitrate)	10 500 Fr	
clôture électrique.....	2 000 Fr	
soit, pour 6 ans de durée.	23 750 × 6 = 142 500 Fr	

(1) Voir « La culture fourragère — D. S. A. de la Charente-Maritime.

Investissements antérieurs :

la perte annuelle due à l'excédent des dépenses sur les recettes représentait avant l'établissement des prairies :

15 000 × 2 ..... 30 000 Fr

L'ha revient ainsi, au bout de la 6e année d'exploitation, c'est-à-dire de la 8e année de culture, à ..... 222 500 Fr

Comme la production fourragère a atteint, dès lors, le coefficient 500, comme nous l'avons calculé chez M. Nicolle aux Mathes (Charente-Maritime), comme nous supposons qu'elle diminuera vers la 5e année pour ne plus dépasser 300, la moyenne aura été de 400 environ pendant 6 ans, soit un prix de revient de l'U. F. d'environ 9,50 francs, prix légèrement inférieur à celui obtenu sur l'agrostidae climacique sans soins (voir fig. D).

Récapitulation :

Site	Type de sol	État de culture	Coéfficient de production	Productivité mesurée par le prix de revient de l'U. F.
Climat Mer du Nord I a Frise	Alluvial non évolué	Climax en voie d'installation (glycériétum) 1er stade	80 à 100	5 F.
I b Frise	id.	2e stade	420 à 490	4 à 4,75 F
Climat atlantique III à IV	mor-mull calcique sur bri	Agrostidae subclimacique	200	10 à 15 F. (1)
	mor-mull calcique défriché et mis en culture rationnelle	Agrostidae subclimacique assainie, labourée, soumise à 2-3 ans de cultures-pionniers et ensemencée en festucæ artificielle	500 1re année 300 en 3e moy. présumée 400	9,50 F.

Discussion : Remarquons combien le climat nordique est favorable à la prairie, non pas qu'il pleuve davantage ou que les pluies soient mieux réparties au cours des saisons (voir statistiques de la pluviométrie et de la t° moyennes sur 40 ans, page 560), mais la température moyenne étant légèrement inférieure, l'évaporation est moindre et l'humidité de l'air (qui ne s'inscrit pas dans le pluviomètre) plus élevée. Ainsi sont favorisées les phases tallage et repousse des graminées si précieuses pour la production herbagère de printemps et d'automne.

En particulier, les stades tallages et repousses d'automne sont inexis-

(1) 15 francs et 25 francs sont les prix de revient de l'U. F. lorsque le climat réduit la période de pâture de 200 à 130 jours, soit une réduction du tiers.

tants dans le marais charentais si cependant les tallages et repousses de mars-avril sont favorisés par l'inondation dans les sub-climax, par l'humidité de ces fonds dans les sites cultivés.

D. — Conclusions :

Les quatre essais comparés, s'échelonnant de la Frise nordique à l'Aunis nous prouvent qu'en dehors du climat prairial exceptionnel de la Frise, l'unité fourragère ne peut être produite à bon marché qu'autant

FIG. D. — Après ensemencement en fétuque des près + trèfle blanc réalisé après 3 ans de culture de céréales (Maïs ou blé ou même Ray-grass d'Italie) la production dépasse en première année 6 000UF/ha. Le développement des fétuques est favorisé par les conditions de milieu au point que le trèfle blanc disparaît. (Marais de Saint-Augustin. Charente-Maritime.) L'aménagement de la productivité est, ici, atteint, achevé.

que le riverain obtienne d'abord l'assainissement total de ses marais et soumette l'horizon AC_0 à de vigoureuses façons.

Cependant, dans le cas où, faute de cet assainissement, il ne peut exploiter qu'un climax résistant aux méthodes culturales (agrostidae), il n'en tire plus qu'un rendement extensif. Si en U. F., il est inférieur environ de moitié, le prix de revient unitaire n'est cependant guère éloigné de celui de la prairie cultivée, du moins dans les années où la pâture peut être prolongée au-delà de six mois.

Il ne faut pas s'étonner, en conséquence, de l'inertie déjà ancienne du milieu maraichin devant ce programme complet de mise en valeur : il attend patiemment, ou que le prix de la viande augmente en flèche, ou que les Pouvoirs publics lui viennent en aide.

Il escompte une subvention, non seulement pour les travaux d'assainissement, mais aussi indirectement pour le fonctionnement de Coopératives d'utilisation de matériel agricole (C. U. M. A.) pour le défrichement et la mise en culture progressive de tous les marais assainis. Quant aux investissements en têtes de bétail, les prêts du Crédit Agricole tels qu'ils viennent d'être décidés à moyen terme, décideront peut-être les riverains charentais à intensifier quelque peu leur système et à passer de 1 U. G. B. à l'hectare à 1,5, puis 3, comme le laissent entrevoir les premières réussites.

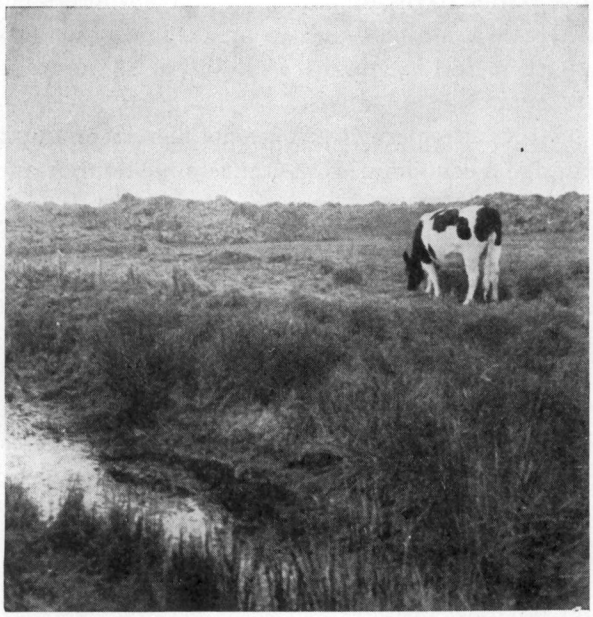


FIG. E. — Aspect du marais de Rochefort en août 1959, année de sécheresse. A l'horizon les énormes tas provenant du curage des fossés. Au premier plan, rigole d'assainissement non curée et envahie de joncs. Les curures sont en quantité suffisante pour combler toutes les dépressions à joncs et à guimauve (*J. effusus* et *Altheae officinalis*) avant d'entreprendre les travaux de mise en culture consécutifs à un assainissement à garantir sur toute l'année.

CONCLUSION

Telles sont les alluvions à texture fine argileuse :

— chargées d'éléments salins conférant une mauvaise structure,

— menacées d'excès d'eau et d'inondations au cours de l'hiver,

— se comportant alors comme sub-climax incultivables et seulement exploitables par « cueillette des animaux ».

Elle n'ont pas encore subi cette évolution climatique qui allège les sols de « leurs raideurs » lorsqu'ils entrent parmi les zonaux.

Sans nous arrêter davantage aux investissements à très long terme (1 500 000 francs par ha) qu'entraîne la création sur les koogs frisons,

hors de France, de prairies à *haute productivité immédiate*, regrettons seulement :

— qu'un plan de nivellement n'ait pas été mis sur pied en même temps que le plan d'assainissement déjà plusieurs fois centenaire des marais charentais (tracé des réseaux dès le XVIIe siècle).

— que le contrat d'affermage n'ait pas fait au fermier ou à son syndicat une *obligation de travailler les sols* avant de les coucher en prairies temporaires. Des connaissances suffisantes de ce genre particulier de sols n'existaient probablement pas à l'époque, mais des calculs de productivité comme ceux des pages précédentes prouvent surabondamment ce que l'économie locale a perdu et perd encore du fait des inondations périodiques d'une part et de l'inertie des exploitants de périmètres pourtant définitivement assainis, d'autre part.

— que des réussites permettant de doubler la production ne trouvent pas davantage d'écho immédiat, étant donné l'importance des investissements exigés.

Faut-il qu'en attendant la généralisation de cette réussite, le riverain démuni conserve l'unique perspective de tirer de l'*agrostidae subclimacique* ce qu'elle peut donner sans façon aucune? Son inertie ne se contentera de cette forme extensive que dans l'espoir de bonnes années où seule, la prolongation de la période de pâture abaissera le prix de revient de l'U. F. à un taux compétitif avec celui des autres productions prairiales. Les autres années, il subira, comme ses pères, ces baisses brutales de rendement de ces milieux encore bruts qu'un défaut d'aménagement coopératif, dépassant le simple stade de l'assainissement, n'a pas encore permis d'assouplir.

Entre le stade *misotte* (glyceria), *agrostidae* ou *hordeae* de ses embouches ovines ou bovines, jusqu'à la *festucae de haut rendement*, il semble bien que le riverain doive être rapidement aidé matériellement et financièrement : alors, il abordera avec confiance l'épreuve des deux ou trois années de cultures-pionniers, faites à pertes.

Ce serait, pour ce versant maraichin des Charentes, un sûr moyen de remplir enfin sa mission dans le développement de la production de la viande, objectif n° 1 de notre économie actuelle à l'orée du marché commun.

RÉSUMÉ

Les alluviaux maritimes sont dépôts assez communs le long du littoral occidental de l'Europe : ils appartiennent à la catégorie des sols azonaux lorsqu'ils sont récents, à la catégorie des sols zonaux du type brun ou des sols intrazonaux du type tourbeux lorsqu'ils sont anciens, et que l'homme les

(1) Particulièrement avec fétuque des prés Trifolium et trèfle blanc S. 100 dans les marais cultivés soumis à des cultures-pionniers pendant 3 ans jusqu'à ce qu'une structure suffisante soit obtenue pour la réussite des semis de graminées.

a abandonnés à leur sort, au lieu de les soustraire à l'évolution climatique pas des techniques adaptées (assainissement, nivellement, labour, culture).

Ayant étudié plusieurs de ces atterrissements entre la frontière danoise au Nord (Frise allemande) et l'embouchure de la Gironde, au Sud, l'auteur analyse ces sols, sans structure du fait de leur teneur en Na, souvent très imperméables, et qui évoluent différemment selon la nature de la pelouse subclimacique qui les peuple. En effet, selon que l'inondation les gagne plus ou moins longtemps chaque hiver, la flore naturelle est différente, et ce que les bovins en laissent, constitue un mull ou un mor : ces horizons A_0 apportent un trouble non négligeable dans le comportement du profil et créent des difficultés lors de la mise en culture qui doit débuter par une homogénéisation.

Dans leur état actuel, non cultivé, seulement exploité extensivement par des bovins dès la baisse des eaux, la production de ces bris grâce à une espèce adaptée d'Agrostis n'est pas nulle. L'exploitant traditionaliste attend des inondations actuellement réglementées (ce qui est un comble) le reverdissement annuel prolongé de ses pâtures, alors qu'elles ne lui apportent que dégradation de la flore et raccourcissement de la période de pacage par destruction aqueuse de la structure (les plantes respirent). Si certaines années, l'exploitant semble même satisfait, c'est qu'une espèce d'Agrostis (A. stolonifera, var. palustris) à végétation abondante, colonise les périmètres inondés dans certaines limites de hauteur et de durée ; l'eau ayant asphyxié les plantes adventices sans valeur fourragère, l'agrostis domine alors et peut donner un fourrage valable, même lorsqu'en fin d'été, les bovins le consomment sec, sur pied, comme un « focage ».

Depuis des siècles, cette production irrégulière d'une année à l'autre suffit à masquer au riverain celle, au moins double, qu'il obtiendrait s'il en arrivait à l'assainissement total : après 2 ou 3 années de cultures-pionniers (céréales, ray-grass italien, ou maïs) indispensables pour homogénéiser le profil et lui donner enfin une structure ; il pourrait alors installer des prairies temporaires à base de fétuques des prés. L'exemple a déjà été donné, les essais ont été concluants (4 000 UF au lieu de 2 000 en moyenne) ; il reste à encourager l'initiative des producteurs.

SUMMARY

Maritime alluvial soils and their cultural uses.

Maritime alluvial soils are quite common deposits along the western coast of Europe : they belong to the azonal group of soils if they are recent, and to the zonal group of brown-soil type if they are ancient and left un touched by man instead of being shielded against the climatic evolution by appro-priate methods (reclamation, plowing, cultivation).

A study of the se alluvia between the Danish frontier in the north (German Frisia) and the estuary of the Gironde in the south showed the soils to be structurless due to high concentrations of Na, often highly impermeable, and evolving differently according to the nature of their sub-climactic grass cover. Actually the natural vegetation differs according to the greater or lesser duration of inondation every winter, and plants left behind by grazing cattle constitute a mull or mor : the se A_0 horizons cause considerable disturbance in the behaviour of the profile and are responsible for difficulties encountered when the soils are brought uder cultivation which should first given a well homogenized substrate.

The soils are, in their present uncultivated state where there is only an extensive utilization by grazing after the water has receded, only little productive. Traditional exploitation, which counts upon the regular inondations, is associated with grazing which delays the regrowth of grass and results in the degradation of vegetation and in ever decreasing grazing periods due to structural deterioration by the water. In some satisfactory years there occurs a colonization of *Agrostis stolonifera* var. *palustris* in areas where the extent and duration of inondation is limited; the water suppresses adventitious plants and the dominant.

Agrostis yields a valuable fodder even if grazed by cattle in a dry state at the end of the summer.

For centuries, this irregular production from one year to another has deprived the inhabitants of the coast of at least twice as high yields obtainable by a complete reclamation. Two or three years of pioneer cultures (cereals, Italian ryegrass or maize), necessary for homogenizing the profile and conferring to it a structure, could be followed by temporary grassland of meadow-fescue dominance. Similar experiments gave positive results (4000 fodder units instead of an average 2000) and now it remains to encourage the farmers to take the initiative.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Marschböden und ihre landwirtschaftliche Ausnützung.

Die Marschböden sind ziemlich verbreitet längs der Westküste Europas, sie gehören zur Klasse der azonalen Böden wenn sie jung sind, zur Klasse der zonalen Braunböden, wenn sie alt sind und wenn der Mensch sie ihrem Schicksal überlassen hat, statt sie der klimatischen Entwicklung durch angepasste Tecknik (Entwässerung, Pflügen, Anbau) zu entziehen.

Nach Untersuchung mehrerer dieser Seeablagerungen zwischen der dänischen Grenze im Norden (Nord-Friesland) und der Girondemündung im Süden, analysiert der Verfasser diese Böden die strukturlos sind wegen ihrem hohen Na-Gehalt, die sehr oft stark undurchlässig sind und die sich verschiedentlich entwickeln je nach der Art ihrer subklimatischen Grasnarbe. Tatsächlich, jenach der Dauer der winterlichen Uberschwemmung ist die natürliche Flora verschieden und was von den Rindern zurückgelassen wird, gibt ein Mull oder Mor : diese A_0-Horizonte verwirren beträchtlig das Benehmen des Profils und bringen Schwierigkeiten mit sich bei ihrem Anbau der durch eine Homogeneisierung anfangen soll.

In ihrem heutigen, nicht bebautem Zustand, ist der Ertrag dieser, nur durch Rinder benützten Flächen nicht gleich Null. Der nach Gewohnheiten arbeitende Landwirt glaubt, dass die zur Zeit gesetzlich bestimmten Überschwemmungen (was ja stark ist) seine Weiden zu einem verlängerten Wiedergrünen bringen, in Wirklichkeit verursachen sie nur eine Verschlechterung der Flora und eine Abkürzung der Weidezeit durch wässerige Vernichtung der Struktur (das Pflanzenatmen). Wenn gewisse Jahre der Landwirt zufrieden ist, so kommt es daher, dass eine gewisse Agrostisart (A. stolonifera, var. palustris) mit starkem Wachstum die unter einer bestimmten Höhe und während einer bestimmten Zeit überschwemmten Flächen bevölkert ; da die wertlosen Unkräuter durch das Wasser erstickt wurden, tritt Agrostis besonders stark hervor und kann ein anständiges Futter geben, sogar am Ende des Sommers, wenn die Rinder es trocken, auf dem Halm fressen.

Seit Jahrhunderten verbarg diese von einem Jahr zum anderen unregel-

mässige Produktion dem Landwirt die, wenigstens doppelte Produktion die er gewinnen könnte bei gründlicher Melioration : nach 2 oder 3 Jahren Anbau von Getreide, welsches Weidelgrass oder Mais, Anbau der notwendig ist um das Profil homogen zu gestalten und dem Boden eine günstige Struktur zu verleihen, danach kann man Wechselwiesen mit Wiesenschwingel anlegen. Beispiele wurden bereits gegeben, die Versuche waren zutreffend (4000 F. E. statt 2.000 im Durchschnitt) ; es bleibt die Initiative derLandwirte zu fördern.

Аллювиальные морские почвы и их земледельческая пригодность.

РИДЕЛЬ.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Аллювиальные морские лёссы являются отложениями достаточно распространенными вдоль западного побережья Европы : они относятся к категории азональных почв, если они молоды, к категории зональных почв типа коричневых, если они старше и если они были оставлены своей судьбе, тогда как человек нарушает ход климатической эволюции своими механическими приемами (мелиорация, распахивание, культуры).

Изучивши много этих отложений между границей Дании на севере (немецкая Фрисландия) и устьем Гаронны на юге, автор производит анализ этих почв, бесструктурных по причине присутствия натрия, часто очень водонепроницаемых, и которые развиваются различно, в зависимости от природы газона, который их покрывает. Действительно, в зависимости от того, что зимнее затопление бывает более или менее продолжительным, дикорастущая флора также бывает различной, и та ее часть, что коровы оставляют неиспользованной, составляет «mull» или «mor» : эти горизонты Ao значительно нарушают поведение профиля и затрудняют осваивание этих почв, которое должно начаться пахотой.

В настоящее время эти почвы не обрабатываются, а только экстенсивно эксплоатируются коровами сейчас же после спадения вод и имеют некоторую продуктивность. Эксплоатант, традиционалист, ждет от затоплений, которые теперь реглементированы (что является неуместным), продолжительного позеленения своих пастбищ, тогда как эти затопления вызывают деградацию флоры и укорочение периода выпаса из-за ухудшения структуры, причиняемого избытком воды (растения должны дышать). Если в иные годы эксплоатант, кажется, даже доволен, то это потому, что одна порода полевицы (Agrostis stolonifera, var. palustris), пышно развивающаяся, занимает затопляемые поверхности, в известных условиях высоты и продолжительности; после того, как вода вызвала асфиксию сорных трав, не имеющих питательной ценности, полевица может доминировать и может дать удовлетворительный фурраж, даже если в конце лета коровы его поедают сухим, несрезанным, в поле, как « focage ».

Эта производительность, непостоянная из года в год, маскирует, в течение веков, ту, по крайней мере вдвое более значительную, что прибрежный житель получал бы, если бы он произвел полное оздоровление : после 2-3 лет пионерских культур (злаки, итальянский райграсс, маис), необходимых для гомогенизации профиля и чтобы ему дать наконец некоторую структуру, он смог бы делать временные луга луговой овсянницы. Пример был уже дан, опыты были убедительны (4.000 UF. вместо 2.000, в среднем); остается лишь поощрять почин производителей.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DE MARTONNE (Emm.). — Traité de Géographie physique. Tome 1er. 4e Édition 1925.

BOURCART (J.) et FRANCIS-BŒUF (Ch.). — La Vase. Hermann et Cie, éditeurs. Paris 1942.

CAYEUX (A.). — Variation du niveau des mers et des terres. *Bulletin de la Sté Géologique de France.* 6e série, tome II. Année 1952.

VERDIE (H.), SILORET (G.) et FRANC DE FERRIÈRE (J.). — Les sols de la Charente-Inférieure. *Annales Agronomiques.* Année 1932.

JORET (G.) et MALTERRE (H.). — Les sols de la plaine maritime picarde. (Marquenterre et Bas-Champs). *Annales Agronomiques,* Nos 1 et 2. 1939.

D. S. A. de la Charente-Maritime. — La Culture Fourragère. 1958.

FERRAND (M.). — Analyse des Plantes et pratique agricole. VIIIe Congrès International de Botanique. Paris.

DUCHAUFOUR (Ph.). — Pédologie et applications forestières et agricoles. École Nationale des Eaux et Forêts. Nancy (M. et M.).

DOCUMENTATION

RICHARD (H.). — **Productivité de la terre. — Fertilisation et rentabilité.** (Flammarion Éditeur).

M. Henri RICHARD, Ingénieur Agronome, Membre de l'Académie d'Agriculture, s'est attaqué à trois problèmes principaux :

Productivité de la terre : apport du sol naturel entretenu par le cultivateur.

Fertilisation : nouveau visage pris par le sol sous l'influence de la fertilisation chimique.

Rentabilité : introduction de la notion du meilleur profit dans l'utilisation des engrais.

M. RICHARD qui, depuis plus de trente ans, s'est consacré à l'expérimentation scientifique des engrais, était particulièrement qualifié pour traiter ces sujets difficiles.

Le livre, très bien présenté, comprend trois parties :

1° Rappel et examen de données générales

2° Description des dispositifs expérimentaux, Études culturales, Bilans économiques.

3° Synthèse et compléments.

La première et la dernière partie pleines d'idées originales et de faits appuyés sur de nombreux exemples, sont une lecture remplie d'enseignements, et constituent un excellent traité de fertilisation, ne laissant aucun point pratique dans l'ombre, et insistant particulièrement sur le côté économique de la question.

La deuxième partie est beaucoup plus difficile à lire. Elle expose les très nombreux essais faits par l'auteur sur des sols de natures différentes. C'est un travail considérable et une source de documents unique pour ceux qui voudront, dans l'avenir, faire des expériences de fertilisation dans différentes régions de France.

Dans cette partie, M. RICHARD nous indique d'abord comment conduire, d'une façon rationnelle, les essais culturaux et ce n'est pas aussi simple que certains pourraient le croire,

Il nous montre également la réaction de différents sols et de différentes cultures aux engrais chimiques.

Certes, il est difficile de tirer de ces expériences des lois générales, et on peut le regretter.

Mais l'étude de nombreux cas particuliers peut néanmoins nous donner des directives quant à l'emploi des engrais dans différents types de sols.

Ce livre doit être lu par tous ceux qui, à un titre quelconque, sont amenés à faire de l'expérimentation en plein champ : Ingénieurs des Services Agricoles, des C. E. T. A. des zones témoins, Instituteurs agricoles, Comptoirs d'Engrais, Chercheurs des Stations Agronomiques. Ils y trouveront de nombreuses données

pratiques qui peuvent leur être fort utiles. Enfin, tous ceux qui s'occupent de l'économie agricole à quelque titre que ce soit, trouveront dans le livre de M. RICHARD, des données de première importance.

P. B.

63 (44)

ROBERT (P.). — **L'agriculture en Dordogne.** Bordeaux, Libr. Ch. Robert, 308 p., 1958.

Publiée avec le concours des Ministères de l'Agriculture et de l'Éducation Nationale, la thèse de M. P. ROBERT a obtenu la mention « très bien » de la Faculté de Droit et de Sciences Économiques de Bordeaux, et le prix 1957 de la Chambre de Commerce de Bordeaux.

Dans une première partie, l'auteur étudie les conditions de l'agriculture en Dordogne : facteurs géologiques et géographiques, régions naturelles, facteurs humains. Une deuxième partie est consacrée à l'état et aux résultats de l'agriculture périgourdine : structure des exploitations, morcellement, modes de faire-valoir, principales productions, élevage, etc. ; l'auteur y analyse les causes du sous-développement de l'économie agricole de la Dordogne. Dans la troisième partie enfin, il envisage les possibilités de remédier à ce sous-développement grâce à une modernisation systématique de l'agriculture et au développement des productions courantes, lesquels ne peuvent se comprendre sans un redressement démographique, l'élargissement du cadre de l'exploitation, une meilleure utilisation du sol, la réduction et le déplacement de certaines cultures, le développement du progrès technique, l'amélioration de la commercialisation etc..

Ainsi que l'indique, dans sa préface, M. J. LAJUGIE, Professeur à la Faculté de Droit et des Sciences Économiques de Bordeaux, Directeur de l'Institut d'économie régionale du Sud-Ouest, cette thèse « constitue une monographie intéressante qui apporte une très utile contribution à l'inventaire économique du Sud-Ouest, préalable indispensable de toute politique rationnelle d'expansion ».

M. L. C.

63 (44)

Ministère de l'Agriculture. — **Monographies agricoles départementales.** Paris, la Documentation Française, 1958-59.

La Documentation Française a entrepris la publication d'un certain nombre de monographies agricoles départementales, établies dans le courant de 1953 et 1954 par les Directions des Services Agricoles avec la collaboration des chefs de service départementaux des Préfectures et des dirigeants d'Associations professionnelles agricoles. Elles groupent les données statistiques relatives aux points suivants : milieu humain, structure foncière, équipement, productions végétales et animales, marché des produits agricoles, forêts et produits forestiers, organisation administrative et professionnelle.

Certains chiffres ayant vieilli depuis l'établissement de ces documents, on a inclu, in fine, dans chaque opuscule, un feuillet de mise à jour sommaire.

Parmi les monographies parues à cette date, signalons : Allier, Cher, Corrèze, Côtes-du-Nord, Drôme, Gard, Gironde, Isère, Lot, Meuse, Morbihan, Puy-de-Dôme, Pyrénées-Orientales, Rhône, Haute-Savoie, Seine-Maritime, Deux-Sèvres, Tarn-et-Garonne, Vienne, Haute-Vienne.

M. L. C.

635. (44)

Direction des Services Agricoles de Vaucluse. — **Les cultures légumières de Vaucluse.** Avignon, Société des Éditions « Vaucluse Agricole », 127 p., 1958.

Illustrée de 16 cartes et 78 photos ou croquis, cette brochure fait le tour des principales cultures maraîchères et légumières actuellement pratiquées dans le Vaucluse, cultures primeurs (asperge, aubergine, concombre, melon, pomme de terre primeur, tomate d'expédition) et cultures de saison (ail, artichaut, asperge de pleine terre, carotte, chou, chou-fleur, épinard, fraise de Carpentras, haricot vert, laitue, oignon, pois, tomate de conserve) ; elle indique, pour chacune, l'historique et l'importance de la culture dans le Vaucluse, l'aire géographique, les variétés cultivées, les assolements et fumures, la technique culturale, les parasites et maladies et les moyens de protection.

M. L. C.

635. 31 (02)

Kidner (A. W.). — **Asparagus.** London, Faber, 1959, 2e éd., 184 p.

Jardiniers amateurs, aussi bien que professionnels, trouveront dans cet ouvrage, écrit par un spécialiste, tout ce qu'il leur faut savoir pour obtenir de bons résultats dans la culture de l'asperge. L'auteur insiste particulièrement sur la sélection et le choix des variétés. Il donne également un aperçu sur les méthodes de culture pratiquées dans différents pays.

635 64 : 631. 5

Allerton (F.). — **Tomato for every one.** London, Faber et Faber Ltd, 1958, 1247.

Destiné aux jardiniers amateurs aussi bien que professionnels, ce manuel donne toutes les indications relatives à la culture des tomates, au jardin ou en serre : choix de l'emplacement, composts, obtention des plants, engrais, parasites et maladies, variétés.

Un chapitre spécial est consacré au système de culture appelé « Ring culture » ou encore « système de culture à deux zones de racines » (« two zone root system ») qui permet de combiner les avantages de la culture normale et de la culture sans sol.

M. L. C.

551. 545. 53 : 631. 61

Climatologie et microclimatologie. Actes du Colloque de Canberra. Recherches sur les Zones Arides, U. N. E. S. C. O., 355 p., 1958.

Dans le cadre des études sur la mise en valeur des zones arides, patronnées par l'U. N. E. S. C. O., un colloque s'est tenu à Canberra en octobre 1956, sur l'invitation du gouvernement australien.

Ce volume présente les communications des nombreux chercheurs australiens et étrangers, suivies d'un bref résumé des discussions sur le sujet : climatologie et plus particulièrement microclimatologie des zones arides.

Les deux premières séances de ce colloque étaient consacrées à l'étude des principaux éléments du climat : bilan hydrique et bilan thermique. Les communications portaient sur l'étude du transfert de la chaleur et de la vapeur

d'eau au voisinage du sol, la mesure de l'évaporation et de l'évapotranspiration, les méthodes de conservation de l'eau du sol, les mesures de rayonnement.

Les deux séances suivantes concernaient la bioclimatologie : étude des groupements végétaux, des disponibilités en eau des végétaux, de la transpiration végétale, action des facteurs climatiques sur la croissance, habitat des insectes, lutte anti-acridienne, etc.

Les exposés suivants concernaient l'étude du microclimat et du comportement des animaux domestiques dans les régions arides ; les modifications du microclimat : modification par la végétation, lutte contre les gelées, pluie provoquée ; et une étude sur la chimie des eaux de pluie.

Enfin, la dernière séance était consacrée aux méthodes de mesure des éléments du climat particulièrement importants dans les zones arides : mesure de l'humidité du sol, de la rosée, de l'humidité atmosphérique ; et à quelques études climatologiques.

Cet ouvrage complète le compte rendu des recherches sur la climatologie des zones arides qui a paru dans la même collection. Ces deux volumes constituent une excellente mise au point des problèmes de la climatologie des zones arides.

R. D.

63 : 41. 3

Dictionnaire technique du machinisme agricole. Centre National d'Études et d'Expérimentation du Machinisme Agricole. Antony (Seine), 1959, 277 p., Prix : 2.500 F.

Reprenant un premier lexique trilingue (français, anglais, allemand) publié en 1950, puis en 1952, le Centre National d'Études et d'Expérimentation de Machinisme Agricole vient de mettre au point une troisième édition revue et notablement complétée de ce document indispensable à tous les techniciens du Machinisme Agricole désireux de suivre dans les textes originaux l'évolution de la technique en dehors de leur propre pays. Cet ouvrage intéresse également tous ceux qui désirent suivre dans les périodiques étrangers la vie de l'agriculture et des sciences connexes, car il contient plusieurs parties générales se référant notamment à l'agronomie, à la botanique, à la zootechnique, aux systèmes d'unités, etc..

Le Dictionnaire Technique du Machinisme Agricole du C. N. E. E. M. A. qui vient de paraître comporte deux parties distinctes :

La première partie qui présente côte à côte, en une classification logique, les termes équivalents utilisés couramment dans les trois langues, contient les rubriques suivantes :

A. — Termes généraux, cultures, élevages, bâtiments agricoles, termes commerciaux.
B. — Unités, poids et mesures.
C. — Éléments de mécanique générale.
D. — Moteurs, carburants et lubrifiants.
E. — Tracteurs, motoculteurs, motofaucheuses et véhicules.
F. — Accessoires et pièces de tracteurs.
G. — Matériels de préparation du sol.
H. — Semoirs et distributeurs.
I. — Pulvérisateurs et poudreuses.
J. — Machines de récoltes et matériels d'intérieur de ferme.
K. — Comptabilité agricole.

L. — Maladies cryptogamiques et insectes nuisibles.

La seconde partie est constituée par un répertoir alphabétique en chacune des trois langues, renvoyant le lecteur à la classification logique par l'intermédiaire de références de classement appropriées.

L'ensemble de l'ouvrage comporte 2.100 mots français, 2750 mots anglais et 2500 mots allemands.

631. 1

HARVEY (N.). — **Farm work study. A basic guide for the farmer, poultry keeper and market gardener.** London, Farmer et Stock-Breeder Publ., 1958, 86 p.

Manuel pratique d'organisation du travail en agriculture, à l'usage des fermiers, éleveurs et horticulteurs. Après 3 chapitres généraux consacrés aux méthodes d'étude et d'organisation des travaux agricoles, l'auteur donne des exemples pratiques d'application de l'organisation du travail à des cas précis : traite, stérilisatoin à la vapeur de couches de semis, nettoyage d'un poulailler, ensilage, distribution d'ensilage à de jeunes Bovins, préparation de composts pour une culture de chrysanthème.

De nombreux schémas, diagrammes et photographies facilitent la compréhension et l'utilisation de cet ouvrage.

631. 432

MARSHALL (T. J.). — **Relations between water and soil.** Harpenden, Commonwealth Bureau of soils, 1959, 91 p.

Cet ouvrage est une vaste mise au point bibliographique (près de 350 références), où l'auteur s'attache avant tout à l'aspect expérimental des recherches et à leur application dans le domaine technique.

Chapitre I. — *Le sol réservoir d'eau.* Est une introduction où l'auteur rappelle quelques généralités qu'il reprend dans le reste de l'ouvrage.

Chapitre II. — *Rétention de l'eau par le sol.* L'auteur étudie la succion de l'eau, sa mesure et son origine et examine l'intérêt qui s'attache aux courbes donnant la succion en fonction de l'humidité.

Chapitre III. — *L'eau dans les sols à forte teneur en argile.* Dans ce chapitre il est traité des phénomènes de gonflement et de retrait et de l'influence particulière des propriétés de surface, compte tenu des cations échangeables.

Chapitre IV. — *Perméabilité du sol saturé ou non* (loi de Darcy, variation dans le temps du coefficient de perméabilité, variation du coefficient de conductibilité avec l'humidité).

Chapitre V. — *Perméabilité et espace poreux.* L'auteur envisage spécialement l'effet de la dimension des particules et de la porosité.

Chapitre VI. — *Distribution de l'eau dans le sol.* L'auteur étudie le problème de la pénétration de l'eau dans le sol et les solutions théoriques avancées par divers chercheurs. Il rappelle également les résultats relatifs à la capacité au champ.

Chapitre VII. — Est consacré au *mouvement de la vapeur d'eau,* mouvement beaucoup plus intense que les formules de diffusion ne pourraient le laisser prévoir et qui doit être aussi dû à un mouvement thermo-capillaire ou à un phénomène de thermo-osmose.

Chapitre VIII. — *Mouvement des sels résultant des grains et des pertes*

d'eau, lié au mouvement « per ascensum » de l'eau et observé mieux quand le sol est sec.

Chapitre IX. — *Disponibilité de l'eau pour les plantes*. L'auteur revient sur l'importante question du point de flétrissement permanent et du degré de disponibilité de l'eau pour les végétaux au fur et à mesure que le sol se dessèche. Il examine en outre les formules qui ont été proposées pour relier la quantité d'eau assimilable à la composition mécanique du sol.

Chapitre X. — *Mesure de la teneur en eau et de la succion* in situ ». Le chapitre est consacré à l'examen de ces méthodes de mesure ainsi qu'à l'évaluation de l'évapotranspiration potentielle.

Chapitre XI. — *Propriétés de l'eau et du sol intéressntales façons culturales*. L'auteur envisage divers problèmes du domaine de la mécanique (consistance et tassement du sol ; adhésion aux corps étrangers), ainsi que le problème de la structure en relation avec les façons culturales.

M. H.

Proceedings of the symposium on role of phosphates in the soil, plant and animal kingdom — Proceedings of the National Academy of Sciences, India. Vol. XXV, *Section A*. Part. IV, V et VI.

Le premier des 3 volumes (Part. IV) est entièrement rempli par l'adresse présidentielle du Prof. N. R. DHAR. Cette adresse de 116 pages est essentiellement consacrée à l'exposé des faits qui ont convaincu l'auteur de l'importance de la fixation non symbiotique de l'azote atmosphérique, fixation largement favorisée par l'addition de substances glucidiques, de phosphates (calciques), et par la lumière.

Les arguments sur lesquels s'appuie le Professeur N. R. DHAR sont tirés aussi bien de ses multiples expériences personnelles que d'observations effectuées dans le monde. Toutes sortes de matières organiques d'origine végétale : fumiers d'herbivores, mélasses, sucres, amidon, glycerol, cellulose, lignine, huiles, pailles, herbes, feuilles, tourbe, lignite, charbon bitumineux finement divisé, etc., mélangées au sol, subissent une lente oxydation qui libère de l'énergie, laquelle permet la fixation de N atmosphérique, plus intense à la lumière qu'à l'obscurité. Toutes les sortes de phosphates calciques essayés, y compris les phosphates naturels finement moulus ou les scories basiques de déphosphoration, favorisent largement la fixation de N, aussi bien à l'obscurité qu'à la lumière. Les phosphates réduisent les pertes d'azote à l'état gazeux lors de la nitrification des sels ammoniacaux.

Le deuxième fascicule (Part. V) est consacré pour une part aux relations entre le phosphore et la matière organique. La chelation des phosphates, notamment par des hydroxyacides aliphatiques et aromatiques, empêche la précipitation de PO_4 par le fer et l'aluminium, et joue un rôle important dans l'analyse du sol au moyen d'acides ou de sels organiques, et dans l'assimilabilité de PO_4 du sol. Cependant la mobilisation du phosphore organique du sol par minéralisation peut comporter des conséquences indésirables, puisqu'elle implique une destruction de la matière organique du sol. Il vaut mieux appliquer des phosphates minéraux que de chercher à mobiliser du phosphore organique, comme d'autres constituants essentiels de l'humus. L'action des phosphates sur la production de gaz combustible par fermentation anaérobie des fumiers est également envisagée.

Diverses questions de physiologie animale et végétale concernant le

rôle du phosphore sont traitées, ainsi que le rôle des engrais phosphatés dans la production végétale et animale.

La troisième partie aborde une grande variété de sujets importants, notamment :

— les phosphates peu solubles, dont l'emploi comme engrais se développe ; influence de leur granulométrie ; action dissolvante des microorganismes ; influence de divers ions sur leur solubilité ;

— fixation et libération des ions phosphoriques dans le sol ;

— dosage du phosphore organique des sols ; une méthode chromotographique pour P phytinique constitue une très utile contribution à cette difficile question ;

— influences réciproques des phosphates et de la vie microbienne ;

— diverses espèces chimiques de phosphates ;

— fumure phosphatée de différentes cultures ;

— rôle des phosphates dans la fabrication des composts.

G. B.

— **Mises au point de chimie analytique pure et appliquée et d'analyse bromatologique.** — Publiées sous la direction de J. A. Gautier. 7e série, Paris, Masson, 230 p., 1959.

Cette nouvelle série comporte les six études suivantes :

Brustier (V.) et Pitet (G.). — La spectrographie d'émission dans l'ultraviolet : Applications en pharmacie, biologie et hygiène.

Cordier (P.). — L'oxydation permanganique en analyse organique. Son utilisation à l'identification des composés éthyléniques.

Kiger (J.). — Méthodes récentes d'analyse des fibres textiles naturelles, artificielles et synthétiques.

Miocque (M.). — L'analyse chimique des composés acétyléniques : Méthodes de caractérisation et de dosage.

Pellerin (F.). — Acquisitions récentes en analyse fonctionnelle.

Saunier (R.). — Analyse des produits sucrés industriels et commerciaux : Saccharimétrie optique et chimique. Densimétrie. Réfractométrie.

Peruchon de Brochard (J.) et Triaca (H.). — **Table de composition des aliments des animaux en acides aminés.** Bureau de la Nutrition animale et de l'élevage (Marseille).

La première partie de cet ouvrage récapitule l'essentiel du problème protéique en alimentation animale, et précise celui de l'équilibre en acides aminés des rations. — Après avoir donné successivement la définition des acides aminés non essentiels, indispensables et critiques, les auteurs indiquent les interrelations entre amino-acides, puis entre certaines vitamines et acides aminés .— Enfin, un chapitre spécial traite de la supplémentation des formules alimentaires à l'aide d'acides aminés de synthèse ou de mélanges de protéines naturelles.

Dans une deuxième partie, cette édition entièrement revue et considérablement augmentée par rapport à l'ancienne Table de 1950, donne, pour un grand nombre d'aliments utilisés en nutrition animale, l'analyse complète en acides

aminés par rapport à la teneur protéique et également par rapport à la matière totale : alanine, arginine, acide aspartique, cystine, acide glutamique, glycine, histidine,hydroxyproline, isoleucine, leucine, lysine, méthionine, phénylalanine, proline, sérine, thréonine, tryptophane, tyrosine, valine.

Cette table représente un ouvrage de base pour la vérification ou l'établissement de l'équilibre aminé de toutes les rations destinées aux animaux Elle permet en particulier de résoudre des problèmes technico-économiques particulièrement importants, comme celui du remplacement de certains aliments coûteux (lait, viande, poisson, etc.) par d'autres beaucoup plus économiques d'origine végétale.

581. 132

BASSHAM (J. A.) et CALVIN (M.). — **Le cycle du carbone dans la photosynthèse.** Trad. par J. DAUTA, Paris, Dunod, 1959, 122 p.,

La Photosynthèse est au centre de la Biologie et de la Physiologie végétales. Dans quelques années, ses applications prendront peut-être une importance économique décuplée. Après le retard dû à la guerre, on ne trouve encore en France que peu de mises au point sur ce sujet fondamental.

Ce nouvel ouvrage, publié dans la Collection des Monographies Dunod, intéresse les étudiants biologistes ou chimistes, à qui elle fournira un rappel des bases classiques, et surtout un précis des acquisitions récentes. Ce travail donne également aux physiciens un exemple des services essentiels de la contribution qu'ils peuvent eux-mêmes apporter aux recherches sur la photosynthèse comme aux recherches biologiques modernes et les aidera donc à s'orienter vers ces recherches.

L'exposé des problèmes théoriques de la photosynthèse, l'indication détaillée des méthodes modernes (chromatographie, isotopes, etc.) notamment, retiendront plus spécialement l'attention des professeurs et des chercheurs.

X. X.

577. 4 (94)

Biogeography and ecology in Australia. La Haye, W. Junk, 1959. — Coll. « Monographiae biologicae », vol. VIII, 640 p.

Consacré à deux problèmes essentiels de la biologie australienne, la biogéographie et l'écologie, ce volume réunit 37 articles dans lesquels différents spécialistes en étudient les multiples aspects : humain, végétal, animal et pédologique.

Parmi ces diverses études, nous relevons :

F. S. BODENHEIMER. — La place unique occupée par l'Australie dans la Biologie.

A. KEAST. — Les oiseaux australiens : leur zoogéographie et leur adaptation à un continent aride

J. W. EVANS. — La zoogéographie de quelques insectes australiens.

K. H. L. KEY. — L'écologie et la biogéographie des sauterelles australiennes

J. H. CALABY et F. J. GAY. — Aspects de la répartition et de l'écologie des termites australiens.

L. EMBERGER. — La place de l'Australie méditerranéenne dans l'ensemble des pays méditerranéens du Vieux Monde.

J. G. Wood. — La phytogéographie de l'Australie.

G. A. Stewart. — Quelques aspects de l'écologie du sol.

R. Carrick. — La contribution du baguage à l'écologie des oiseaux australiens.

A. B. Costin. — La végétation des montagnes en Australie en relation avec l'utilisation du sol.

N. C. W. Beadles. — Quelques aspects des recherches écologiques dans les régions semi-arides de l'Australie.

R. G. Downes. — L'écologie et la prévention de l'érosion du sol.

I. W. McDonald. — Le mouton Mérinos en Australie.

F. N. Ratcliffe. — Le lapin en Australie.

A. P. Doodd. — Lutte biologique contre les *Opuntia* en Australie.

F. A. W. Morley O. H. Franrel. — Un programme de recherches éconogénétiques avec des plantes importées.

R. Carrick et A. B. Costin. — La protection de la nature en Australie.

M. L. C.

631. 459 : 631. 61

Kohnte (H.) et Bertrand (A. R.). — **Soil conservation**. London, Mc Graw-Hill., 298 p., 1959.

Traité pratique de conservation du sol, dans lequel les auteurs exposent successivement les causes de l'érosion du sol, les buts et les principes de la conservation du sol, et passent en revue les méthodes utilisées pour lutter contre l'érosion et maintenir la productivité du sol. Chaque chapitre est illustré de nombreux dessins et photographies et est suivi d'une bibliographie.

M. L. C.

633. 2/3 : 631. 811. 94

Williams (R. D.). — **Minor elements and their effect on the growth and chemical composition of herbage plants.** Commonwealth Bureau of Pastures and Field Crops, Harley (Berkshire) Mimeogr. Publ., n° 1, 68 p., 1959.

Revue bibliographique de l'ensemble des connaissances actuelles sur les oligoéléments. Tout en étudiant spécialement les plantes de prairie, l'auteur indique d'une façon générale le rôle des éléments-traces essentiels dans la nutrition des végétaux, leur distribution dans la plante, les inter-relations entre éléments, les facteurs intervenant dans l'alimentation et la composition des plantes (climat, sol, stade physiologique, etc.), les méthodes de diagnostic et de traitement des carences des excès. En ce qui concerne plus particulièrement les plantes de prairie, on trouve ici des données sur les relations entre éléments-traces et composition botanique des prairies, et des tableaux des teneurs de plantes de prairie en éléments-traces. 350 références.

S. T.

631. 841. 7 : 632. 122 - 1

RECHERCHES SUR LES EFFETS TOXIQUES DU BIURET ET SUR L'ÉVOLUTION DE CE COMPOSÉ DANS LES SOLS

PAR

R. GADET, L. SOUBIES, F. FOURCASSIE

Service des Recherches Agronomiques
de l'Office National Industriel de l'Azote, Toulouse.

PLAN DU MÉMOIRE

I. — Introduction — revue des travaux antérieurs — problèmes à résoudre.

II. — Toxicité du biuret en applications racinaires ou foliaires.

A. — Toxicité du Biuret sur la germination du blé.
1° Germination du Blé sur Sable.
2° Germination du Blé en sol normal.

B. — Toxicité du Biuret sur la végétation du Blé — Essais en pots de végétation.

C. — Toxicité du Biuret sur la Germination et la Végétation du Maïs — Essais en pots de végétation.

D. — Toxicité du Biuret sur la végétation de la Pomme de terre.
1° Essais de plein champ.
2° Essais en pots de végétation.

E. — Toxicité du Biuret par application en pulvérisations foliaires.
— sur Blé,
— sur Vigne,
— sur Pêchers et Poiriers,
— sur Citrus.

III. — Biuret et pouvoir absorbant du sol — déplacement sous l'influence de l'eau infiltrée.

IV. — Hydrolyse et nitrification du biuret dans le sol.

A. — Hydrolyse et Nitrification du Biuret seul.
1° En Étuve à 28°C.
2° A la température extérieure en hiver.

B. — Hydrolyse et Nitrification du Biuret en présence d'urée.
1° En Étuve à 28°C.
2° A la température extérieure en hiver.

V. — Conclusions et résumé.

I. — INTRODUCTION ET REVUE DES TRAVAUX ANTÉRIEURS PROBLÈMES A RÉSOUDRE

Le biuret NH_2-CO-NH-CO-NH_2 est un composé dérivé de l'urée NH_2-CO-NH_2-. Il se forme dans l'urée fondue ou en solution très concentrée à la température voisine de son point de fusion par décomposition de la molécule d'urée avec libération d'ammoniac NH_3. Il s'en rencontre donc plus ou moins dans l'urée de fabrication industrielle livrée comme engrais azoté à l'agriculture.

Selon les précautions prises au cours de la concentration des solutions on peut trouver entre 0,2 et 2 p. 100 de biuret dans l'urée (*).

Au début des fabrications aux U. S. A. un procédé de granulation par fusion sèche de l'urée était appliqué. Il donnait des produits riches en biuret (de 5 à 8 p. 100) qui provoquèrent des accidents spectaculaires sur les orangers de Californie et de Floride.

L'attention fut ainsi attirée sur ce composé particulier et l'étude de sa toxicité comme de son évolution dans le sol fut entreprise par les agronomes américains.

A. — Effets toxiques du biuret en pulvérisations foliaires

C'est en janvier 1953 que l'on signale pour la 1re fois en Californie, des symptômes pathologiques à la suite de l'emploi d'urée commerciale américaine en pulvérisation.

Dans un article paru à cette date, JONES et STEINOCKER (1) font état de dégâts par pulvérisations sur citrus. Une solution à 1,80 p. 100 d'urée commerciale apportant environ 150 g d'urée par arbre et par intervention, a produit au mois de mai, après deux applications des dégâts sur les feuilles : jaunissement de l'extrémité des jeunes feuilles « yellow-tip ». Les dégâts augmentaient aux concentrations plus élevées et on constatait également des brûlures sur les vieilles feuilles, suivies d'une défoliation partielle de l'arbre.

Les auteurs ne pensent pas à incriminer une impureté de l'urée et les taux de biuret des produits utilisés ne sont pas précisés.

Dans un compte rendu ultérieur de ces travaux (2) le premier de ces auteurs attribue la toxicité de l'urée commerciale granulée à sa teneur sensiblement plus élevée en biuret que les urées cristallisées ; ce biuret se serait produit lors du chauffage de l'urée pour son conditionnement.

Il constate l'apparition du « yellow-tip » après pulvérisation d'une

(*) Les fabrications françaises courantes actuelles contiennent autour de, ou moins de 1 p. 100 de biuret.

solution à 0,2 p. 100 de biuret pur, ou à 2 p. 100 d'urée granulée, sur de jeunes orangers en pots. Le même résultat est obtenu par application au sol de 50 cc des mêmes solutions par pot. En pleine terre, une solution à 1,2 p. 100 d'urée cristallisée n'a provoqué aucun dégât, alors que l'urée granulée a donné une chlorose 6 semaines après.

Peu de temps après, en Floride, OBERBACHER (3) précisait les conditions d'apparition des chloroses consécutives à l'application de biuret sur citrus.

Il n'observe pas de chlorose par pulvérisation mensuelle d'une solution à 1,44 p. 100 d'urée commerciale dosant 0,1 p. 100 de biuret (15 p. p. m. de biuret dans la solution appliquée) — Chlorose fugace à 0,3 p. 100 de biuret (45 p. p. m.) — chlorose persistante à 0,6 p. 100 (90 p. p. m.). En été, les symptômes peuvent apparaître trois jours après l'application, tandis qu'en hiver, ils peuvent ne se manifester que 15 semaines plus tard.

La chlorose se manifeste également sur de jeunes orangers arrosés au pied avec une solution contenant 100 g d'urée commerciale et 5 g de biuret dans 1 litre d'eau.

SANFORD et ses collaborateurs (4) aux Iles Hawaï observent sur ananas des nécroses de l'extrémité des feuilles à la suite de pulvérisations d'une solution à 4,2 p. 100 d'urée commerciale à 3 p. 100 de biuret (6,8 g de produit par pied). Une solution de biuret pur à la même concentration (1240 p. p. m.) donnait le même résultat.

La toxicité du biuret a été décrite sur cerisiers par WALKER et FISCHER (5). Une chlorose marginale des jeunes feuilles est apparue lors de leurs essais, deux semaines après pulvérisation avec une solution à 0,72 p. 100 d'une urée commerciale dosant 8 p. 100 de biuret (solution à 580 p. p. m. de biuret) à raison de 28,4 l par arbre (205 g d'urée commerciale par arbre apportant 16 g de biuret). La chlorose était beaucoup plus faible avec des urées à 1 et 1,5 p. 100 de biuret et l'urée cristallisée ne causait pas de dommages.

En opérant sur de jeunes caféiers VAIDYANATHAN, COKKANNA et NORAYANAN (6) ont constaté des nécroses de l'extrémité des feuilles à la suite d'aspersions de jeunes plants avec une solution à 0,22 p. 100 d'urée granulée à raison de 24 interventions ayant apporté au total 4 g d'urée par plant. Les symptômes ont subsisté quelques mois mais sans effet néfaste sur la croissance.

Des malformations de feuilles ont été également observées sur des caféiers adultes qui recevaient de l'urée granulée depuis 4 ans, mais sans que la récolte en soit affectée : leur analogie avec celles qui furent obtenues expérimentalement laissait penser qu'il s'agissait d'une toxicité du biuret.

Les teneurs en biuret des produits utilisés par les expérimentateurs ne sont pas indiquées.

B. — Effets toxiques du biuret par absorption racinaire ou sur la germination

Dans un article paru en juin 1954, HAAS et BRUSCA (7) relatent des expériences sur boutures de citronniers et avocatiers alimentés par une solution nutritive.

Une brûlure marginale des feuilles apparaissait après l'addition momentanée de biuret aux taux de 50 p. p. m. (soit 100 mg de biuret pour un pot de 11,3 l de capacité). Elle n'intéressait que les feuilles en voie de croissance. Les feuilles adultes n'étaient touchées que pour une dose de biuret plus élevée.

Des essais en pots effectués par RAI, HAMNER et COOK (8) ont montré que le biuret en apport au sol à la dose de 31 à 125 kg/ha de produit arrêtait la croissance des haricots. Les dégats sont plus ou moins importants suivant le type du sol.

Des effets toxiques attribués au biuret ou à une autre impureté de l'urée ont été constatés par DROSDORFF et ses collaborateurs (9) sur une plantation de tungs (aleurites cordata) recevant des doses variables d'urée commerciale depuis 5 ans. Mais les taches nécrotiques apparues sur les feuilles diminuaient à la suite de forts apports de potasse. Comme par ailleurs le biuret n'était pas dosé dans le produit employé on peut se demander s'il était véritablement à incriminer.

Au Japon, FUNABIKI, OGATA et SAKOMOTO (10) (11) opérant sur du blé, de l'orge nue et du paddy, constatent que la germination se fait bien mais que la croissance est considérablement retardée en présence de concentrations élevées de biuret. Avec de l'urée contenant plus de 5 p. 100 de biuret, la croissance et la production du blé étaient diminuées, tandis que le paddy se montrait beaucoup plus résistant.

La toxicité est augmentée par localisation du produit dans une fraction de la terre du pot de culture.

Les phénomènes toxiques étaient plus accusés en hiver qu'en été.

Au japon, également, OKUDA opérant avec des urées contenant de 1 à 10 p. 100 de biuret, constate qu'au-dessus de 5 p. 100 la croissance et la productivité du blé étaient réduites, mais non celles du riz. La germination du riz, de l'orge, du blé et des radis s'effectuait dans des solutions contenant de 0,0125 à 0,1 p. 100 de biuret, mais la croissance des semis était arrêtée.

En étudiant également l'action du biuret sur la germination des plantes, HOFFMANN (12) a constaté qu'à la dose de 10 kg de biuret à l'ha, les semis de lin et de pois ne levaient plus. Ceux de maïs, blé, avoine, luzerne, de haricots, concombres, radis, carottes, navets, tomates et laitues étaient endommagés — ceux de betterave à sucre, par contre semblaient stimulés.

Des travaux de SMIKA et SMITH (13), il ressort que lorsqu'on applique au contact direct de la graine en cours de germination, de l'urée pure, les dégâts sur la levée des plantules de blé sont moins importants que lorsqu'on emploie un engrais électrolyte. Avec de l'urée granulée contenant du biuret, les dégâts sont d'autant plus graves que la quantité de biuret apportée est plus élevée et que le taux d'humidité du sol est plus près du point de flétrissement.

WIDDOWSON, PENNY et WILLIAMS (14) opérant sur pomme de terre ont observé des accidents en début de végétation avec de l'urée contenant plus de 4 p. 100 de biuret. Une urée à taux de biuret plus faible, mais localisée au voisinage du tubercule provoqua de légers dégâts ; cependant le rendement final fut le même qu'avec du sulfate d'ammoniaque.

Les essais de STAROTSKA et CLARK (15) confirment les constatations de certains auteurs cités précédemment, à savoir que les seuils de toxicité du biuret semblent être sous la dépendance des conditions de température. Ces auteurs ont constaté que le biuret avait une influence néfaste sur la croissance du ray-grass anglais, lorsqu'on l'appliquait à la dose de 70 à 100 kg/ha durant les mois d'hiver en supplément d'une dose de 50 kg d'azote, sous forme de sulfate d'ammoniaque. A dose plus faible (20 à 40 kg/ha), il n'y avait pas d'effet dépressif et le biuret était une source azotée valable. Dans des conditions de température plus élevée, toutes les doses de biuret donnaient des excédents de récolte. Une autre expérience sur coton, maïs, tomates et avoine faite durant l'été sur un sol à bonne activité nitrifiante avec 112 kgN/ha dont 25 kg de biuret n'a pas produit d'effet toxique sur les cultures. Cette application était réalisée avec un mélange d'une partie de biuret pour 9 parties d'urée pure correspondant à une urée qui contiendrait 10 p. 100 de biuret. Des essais de nitrification en étuve ont montré que le biuret nitrifiait dans ce sol plus lentement que le sulfate d'ammoniaque ou l'urée, mais qu'au bout de 15 semaines les taux de nitrification de ces différents produits étaient égaux. Cette constatation expliquait les résultats obtenus sur ray-grass.

Il convient de rapprocher de ces résultats l'opinion émise par les techniciens de la canne à sucre de l'Ile Maurice (16) :

« Des expériences faites au laboratoire avec l'urée semblent indiquer » définitivement que lorsque l'engrais contenant l'urée est appliqué » directement au sol, les effets supposés nuisibles du biuret sont » insignifiants, même quand le taux de biuret excède de beaucoup la » faible quantité pouvant se trouver occasionnellement dans l'urée » engrais. »

Pour O. T. ROTINI (17) le biuret ne serait pas responsable de la toxicité des urées commerciales. L'auteur aurait obtenu la germination

et le développement normal du blé, maïs, orge, coton, haricots, petits pois, vesces et citrus, alimentés avec des solutions coulantes contenant 5 000 p. p. m. de biuret et pratiquement saturées de ce composé.

On ne connaît à l'heure actuelle que peu de choses du mode d'action du biuret sur la croissance et le métabolisme des plantes.

Une étude de WEBSTER, BERNER et GANSA (19) amène ces auteurs à la conclusion que le biuret inhibe directement ou indirectement la synthèse des protéines. Le biuret produit une forte baisse du total des protéines, et inhibe l'incorporation d'acides aminés dans les protéines des feuilles. Cet effet est renforcé par la présence d'urée. Par contraste, l'urée pure amène une augmentation du taux des protéines de la feuille.

Dans une étude menée parallèlement à celle qui fait l'objet du présent mémoire, J. CARLES montre que le mécanisme d'intoxication est complexe. Le biuret provoquerait un trouble assez général du métabolisme tant organique que minéral (23).

EN RÉSUMÉ : Les faits acquis par les différents expérimentateurs peuvent s'énoncer de la manière suivante :

1° le biuret est toxique pour les végétaux.

2° Les différentes espèces végétales manifestent des tolérances très différentes vis-à-vis du biuret. Les plus sensibles semblent être les citrus et les moins sensibles les graminées.

3° Le seuil de toxicité par pulvérisation foliaire est nettement plus bas que par nutrition racinaire.

4° Les phénomènes d'intoxication par le biuret apparaissent d'autant plus rapidement que le végétal est à un stade de vie plus active. Il se traduisent préférentiellement et en premier lieu sur les tissus en voie de croissance.

5° Bien que certains auteurs (6) (8) semblent admettre une accumulation du biuret dans le sol, la majorité reconnaît que les seuils de toxicité varient avec la température (10) (11) (13) ou avec le type de sol (8) ; ce qui peut s'expliquer par une hydrolyse plus ou moins rapide suivant les conditions de sol.

A faible dose, ou après hydrolyse, le biuret se comporte comme un stimulant de la végétation (10) (11) (13).

6° Il semble que le seuil de toxicité du biuret soit abaissé en présence d'urée (3) (17).

7° Il est difficile de préciser les seuils de toxicité pour les différentes cultures. Les différents expérimentateurs ne se sont intéressés au taux de biuret du produit qu'ils employaient que lorsqu'ils ont observé des dégâts. Ceux qui signalent la toxicité du biuret semblent avoir opéré le plus souvent à des concentrations très supérieures au seuil de toxicité.

LES PROBLÈMES A RÉSOUDRE

Si la toxicité du biuret pour la végétation paraît bien un fait établi, il est cependant malaisé, à la suite de ces différents travaux, de se faire une idée exacte des dangers que peut présenter le biuret contenu dans l'urée utilisée comme fertilisant.

S'agit-il d'un composé pouvant s'accumuler dans le sol et devenir toxique à la longue même s'il était appliqué chaque année à très faible dose à l'occasion de la fertilisation azotée? ou bien avons-nous affaire à un corps susceptible de subir assez rapidement une hydrolyse qui le rendra inoffensif? Est-il ou non fixé par le sol et peut-il être lessivé par les eaux de pluie? Quel est le taux limite supporté par des graines en germination ou les cultures et la dose de sécurité à ne pas dépasser? Cette dose critique risque-t-elle pratiquement d'être atteinte à l'occasion des applications d'urée impure? Convient-il en conséquence et tout au moins pour certains usages de condamner les applications d'urée ou tout au moins de prescrire l'utilisation d'urée purifiée ; quels seraient les taux de biuret admissibles pour les usages courants? Telles sont les questions auxquelles le présent travail voudrait répondre.

II. — TOXICITÉ DU BIURET EN APPLICATIONS RACINAIRES

A. — Toxicité du biuret sur la germination du blé

En étudiant cette question, les Japonais FUNABIKI, OGATA, SAKOMOTO (10) (11) et OKUDA n'ont pas constaté d'arrêt total de germination, mais seulement un ralentissement de croissance ensuite. Aux Etats-Unis, HOFFMANN, a conclu dans le même sens.

SMIKA et SMITH constatent et précisent la toxicité du biuret sur la germination ; elle se traduit par un ralentissement ou un arrêt total quand la dose de biuret augmente.

Pour ROTINI, par contre, le biuret n'a pas d'action directe ni sur la germination, ni sur la végétation, même à concentration élevée (0,5 p. 100). Le cyanate d'ammonium, formé par transformation isomérique de l'urée elle-même, serait seul responsable des accidents de végétation constatés à la suite d'utilisation d'urée.

1° Germination de blé sur sable

Nous avons testé la toxicité du biuret sur la germination du blé, par l'expérience suivante : dans des plateaux en matière plastique de 450 cm² de surface, on dispose une couche de sable siliceux stérile de

1,5 cm d'épaisseur où l'on enfonce légèrement 50 grains de blé de semence trié. Le sable est imbibé à saturation avec les solutions à étudier et l'évaporation est compensée journellement par de l'eau ordinaire.

TABLEAU I

	Biuret seul	Biuret + NH_4NO_3		Biuret + Urée		
	Biuret p. p. m. dans la solution	Biuret p. p. m.	NH_4NO_3 °/₀₀	Biuret p. p. m.	Urée °/₀₀	% de biuret dans l'urée
H_2O ordinaire.....	0	0	0	0	0	0
Biuret dose 0.....	0	0	2,65	0	2,00	0
» 1.....	10	10	2,65	10	2,00	0,5
» 2.....	40	40	2,65	40	2,00	2,0
» 3.....	80	80	2,65	80	2,00	4,0
» 4.....	200	200	2,65	200	2,00	10,0
» 5.....	400	—	—	400	2,00	20,0
» 6.....	1000	—	—	—	—	—

1er *essai : Fortes concentrations en biuret.*

On a observé la germination du blé, en présence de quantités croissantes de biuret, soit seul, soit avec présence simultanée d'urée ou de nitrate d'ammoniaque.

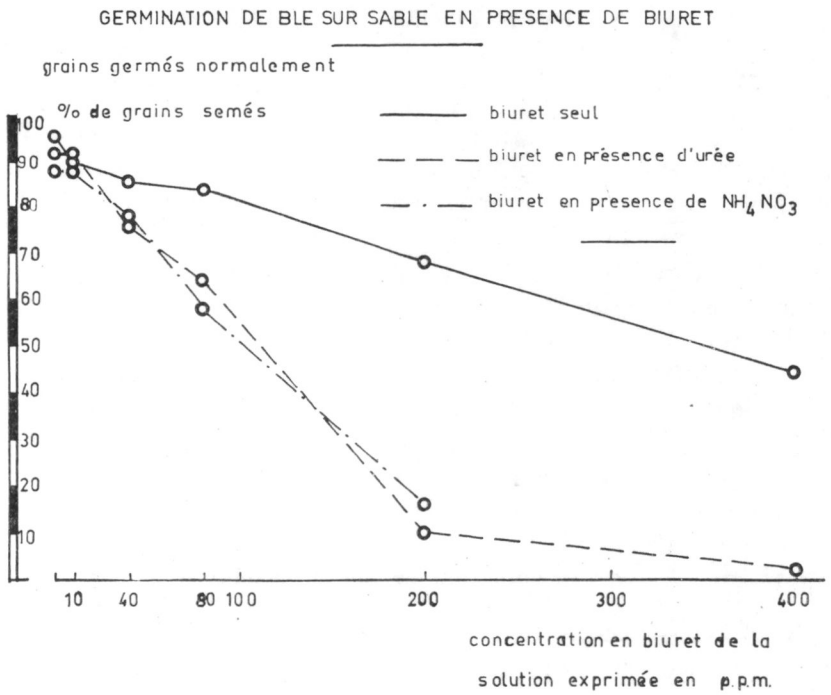


FIG. 1.

Le tableau I donne la composition des solutions étudiées, préparées avec de l'eau ordinaire. La concentration en azote des solutions d'urée et de nitrate d'ammoniaque est la même : 0,92 p.1000.

Les résultats sont donnés au tableau II et figurés au graphique n° 1.

On a compté un grain germé normalement quand il développe sa première feuille.

TABLEAU II

	Nombre de grains % de grains semés			
	Germination normale	Germination normale mais retardée	Germination retardée suivi de mort	non germés
H_2O	94	2	0	4
Biuret dose 0				
seul	94	2	0	4
avec urée	78	14	4	4
avec NH_4NO_3	70	18	2	10
Biuret dose 1				
seul	88	2	4	6
avec urée.....	78	14	4	4
avec NH_4NO_3	78	10	0	12
Biuret dose 2				
seul	72	14	8	6
avec urée	40	36	14	10
avec NH_4NO_3	40	38	8	14
Biuret dose 3				
seul	56	28	6	10
avec urée	2	62	28	8
avec NH_4NO_3	0	58	16	26
Biuret dose 4				
seul	4	64	22	10
avec urée	0	10	74	16
avec NH_4NO_3	0	16	64	20
Biuret dose 5				
seul	0	44	52	4
avec urée	0	2	94	4
Biuret dose 6				
seul	0	0	94	6

On l'a compté avec développement retardé, s'il développe cette feuille 4 jours après les premiers grains germés dans le témoin à l'eau pure.

Cet essai met en évidence les faits suivants :

Le biuret est un toxique pour la germination du blé. Cette toxicité se manifeste quand la concentration en biuret augmente, d'abord par un retard à la germination et un développement plus lent de la jeune plante, ensuite par la mort de la jeune plante, immédiatement après la germination, enfin par la non germination.

Le retard est décelable pour une concentration de 40 p. p. m. de biuret seul dans la solution entourant le grain.

Il est marqué à 80 p. p. m.

Il y a germination mais inhibition du développement ultérieur pour 50 p. 100 des grains à 350 p. p. m.

Il y a inhibition totale à 1 000 p. p. m.

La toxicité du biuret est sensiblement aggravée par la présence simultanée d'un composé azotée comme l'urée ou le nitrate d'ammoniaque.

En l'absence de biuret, on observe déjà une phytotoxicité de ces deux sels, puisque pour 94 p. 100 de germination normale dans le témoin, on n'a que 78 p. 100 avec l'urée et 70 p. 100 avec le NH_4NO_3 purs. Quand la dose de biuret augmente, il n'y a pratiquement pas de différence entre l'urée et le NH_4NO_3 comme sel accompagnateur.

En présence d'urée, il y a ralentissement marqué, mais pas de dégâts graves, à 40 p. p. m. de biuret dans la solution d'urée à 2 p. 1000, le grain baignant dans cette solution.

Il y a inhibition de développement pour 50 p. 100 des grains à 100 p. p. m. Il y a inhibition pour 90 p. 100 à 200 p. p. m. L'inhibition est totale à 400 p. p. m.

2e *essai : faibles concentrations.*

En vue de préciser l'action du biuret aux concentrations faibles et en présence d'urée, sur la vitesse de germination, nous avons effectué un second essai selon le même mode opératoire.

Le tableau III donne la composition des solutions utilisées.

TABLEAU III

	Biuret p. p. m. dans la solution	Urée o/oo	Biuret % dans l'urée
H_2O ordinaire	o	o	
Biuret dose o	o	2,0	o
— 1	5	2,0	0,25
— 2	10	2,0	0,50
— 3	20	2,0	1,00
— 4	40	2,0	2,00

Le tableau IV donne les résultats obtenus, exprimés en grains germés normalement en fonction du temps.

Il y avait 3 répétitions par traitement, soit 3 plateaux de 50 grains, et la discussion statistique de l'expérience a été faite.

Ces résultats permettent d'avancer les conclusions suivantes :

— L'urée pure en solution à 2 p. 1000 provoque un léger retard de germination. Ce retard est comblé à 8 jours mais il y a un manque à la levée global significatif.

Cette action n'est pas spécifique à l'urée puisque le nitrate d'ammo-

niaque provoque des effets analogues avec une intensité légèrement plus forte.

— Le biuret en présence d'urée provoque un ralentissement de germination, décelable à 7 jours mais non significatif pour une concentration de 5 p. p. m. — Ce retard devient significatif à partir de 10 p. p. m. — Il est comblé à 8 jours pour 5 p. p. m., à 10 jours jusqu'à 20 p. p. m., à 15 jours pour 40 p. p. m.

TABLEAU IV

Jours après le semis:	Grains germés normalement % de grains semés Nombres cumulés					
	6	7	8	10	12	15
H_2O	26	70	90	96	98	98
Biuret dose 0	10	54	84	88	88	88
— 1	6	40	76	92	92	92
— 2	6	32	68	94	94	94
— 3	2	26	58	84	88	90
— 4	2	16	44	78	82	84
p. p. d. s. à P = 0,05 (20 contre 1)		18	16	8	8	8

— Jusqu'à 40 p. p. m. le biuret en présence d'urée ne provoque pas de manque à la levée global significatif par rapport à l'urée.

Par contre il est curieux de constater que les concentrations de 5 et 10 p. p. m. en biuret ne gênent pas la germination et que le taux de germination serait au contraire plutôt supérieur à celui de l'urée pure.

2° Germination du blé en sol normal

L'expérience précédente a été reprise avec le sol comme milieu de germination, dans des conditions beaucoup plus voisines de la réalité.

Nous avons utilisé trois types de sols, différant entre eux, surtout par leur taux d'argile :

A. — sol sableux humifère acide ..... Argile % 1
B. — sol de limon sableux légèrement acide ..... — 10
C. — sol de limon très faiblement acide..... — 16

Pour chacun d'eux, on a réalisé deux séries de taux d'humidité différents : 80 et 55 p. 100 de la capacité de rétention pour l'eau. Les sols ont été préalablement amenés au taux d'humidité de 55 p. 100 de la capacité, et disposés dans des plateaux de matière plastique de 400 centimètres carrés.

Les produits à tester ont été mélangés à la totalité de la terre de chaque plateau, soit une répartition sur 5 cm de profondeur.

Après semis à 1 cm de profondeur de 50 grains de blé « Étoile de Choisy » par plateau, l'humidité de la série à 80 p. 100 de la capacité a été complétée par arrosage en surface.

Le tableau V indique les traitements en comparaison et les conditions de l'expérience.

TABLEAU V

Traitements	Azote kg/ha	Biuret							
		kg/ha	p.p.m. de sol sec	p. p. m. dans la solution de sol					
				80 % de la capacité en eau			55 % de la capacité en eau		
				A	B	C	A	B	C
1. Témoin	0	0	0						
2. NH_4NO_3	60	0	0						
3. Urée pure	60	0	0						
4. Urée à 0,4 % de biuret	60	0,53	0,85	5,5	5,2	3,7	7,9	7,5	5,4
5. Urée à 1,0 % de biuret	60	1,3	2,10	13,4	12,8	9,1	19,4	18,4	13,3
6. Urée à 2,2 % de biuret	60	3,0	4,7	30	29	21	44	42	30
7. Urée à 4,4 % de biuret	60	6'0	9,3	60	57	41	86	82	59
8. Urée à 7 % de biuret	60	9,0	14,8	95	90	64	137	130	94
9. Urée à 10 % de biuret	60	13,0	21,2	136	129	92	196	186	134

Le tableau VI indique le nombre de grains germés et ayant développé leur première feuille en fonction du temps ; il ne rend compte que de la vitesse de germination mais pas de l'état de la végétation.

Ces résultats sont figurés au graphique 2.

Le graphique 3 précise la vitesse du développement ultérieur de la jeune plante après la germination et indique l'état de la végétation, 21 jours après le semis.

Ces différents résultats peuvent se résumer ainsi :

— En présence d'urée appliquée à la dose qui correspondrait à 60 kg d'azote à l'ha, et pour une répartition réalisée sur 5 cm d'épaisseur de sol, le biuret, jusqu'à la concentration de 2,1 p. p. m. de sol sec ne provoque aucun ralentissement décelable de la germination et du développement ultérieur.

— A la concentration de 4,7 p. p. m. il en est de même pour les sols A et C. Pour le sol B, le développement est légèrement ralenti.

— A la concentration de 9,3 p. p. m. il y a ralentissement visible de la germination et du développement ultérieur, surtout sensibles dans le sol B. Pour les 3 sols, le ralentissement est accentué par la restriction d'humidité. Les dégâts réels sont faibles, 4 p. 100 en moyenne et indépendants du taux d'humidité.

— A la concentration de 14, 8 p. p. m., il y a ralentissement marqué de la germination et du développement ultérieur. Cela est net pour les 3 sols et est accentué par l'humidité restreinte. Les dégâts réels demeu-

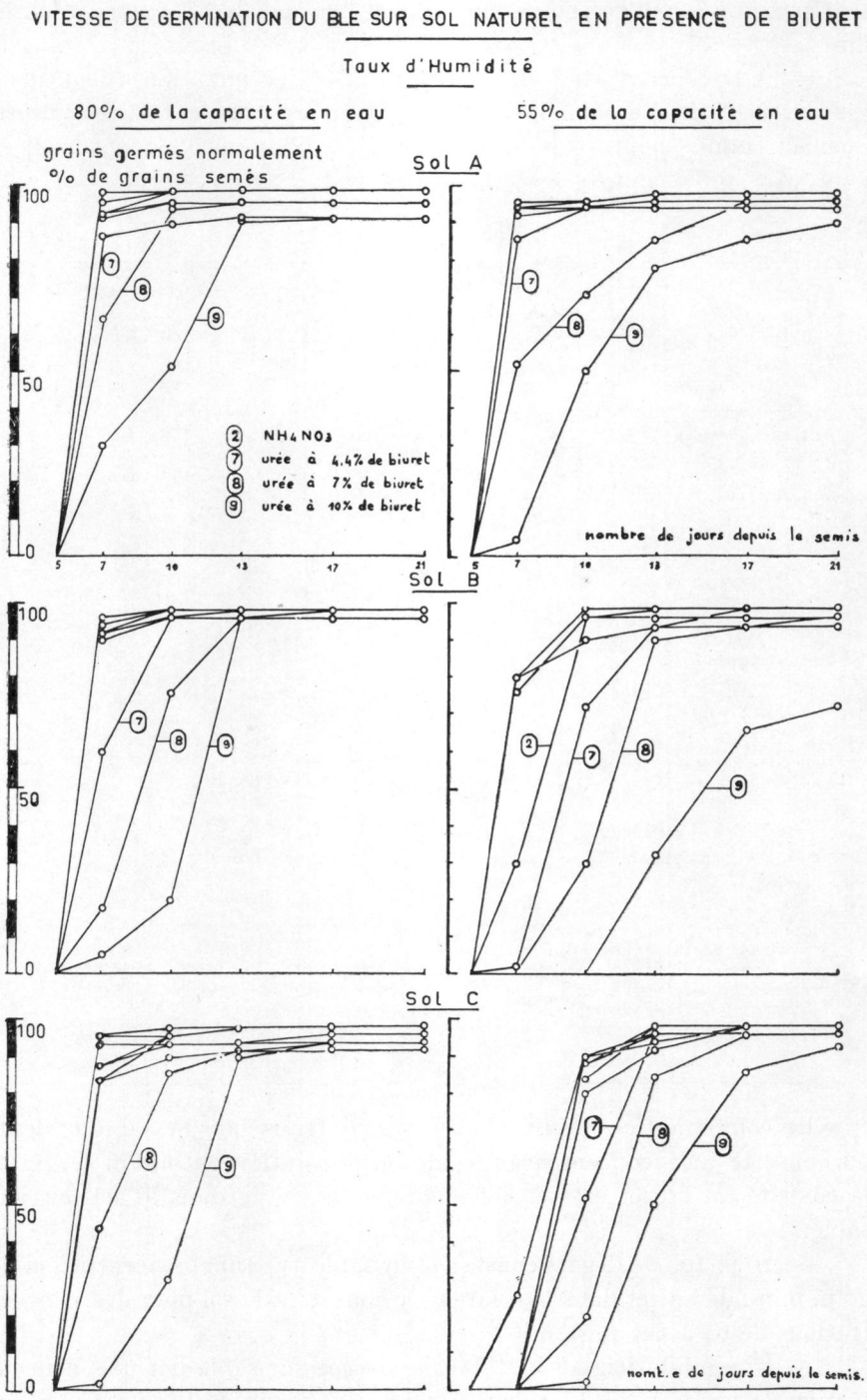

VITESSE DE GERMINATION DU BLE SUR SOL NATUREL EN PRESENCE DE BIURET
Taux d'Humidité
80% de la capacité en eau
55% de la capacité en eau
grains germés normalement
% de grains semés
Sol A
Sol B
Sol C
100
50
0
5
7
10
13
17
21
2 NH4NO3
7 urée à 4.4% de biuret
8 urée à 7% de biuret
9 urée à 10% de biuret
nombre de jours depuis le semis
nomt.e de jours depuis le semis.

FIG. 2.

rent peu graves, 10 p. 100 en moyenne et peu sensibles au taux d'humidité.

— A la concentration de 21,2 p. p. m., la germination a lieu, mais est très ralentie. Le développement ultérieur est très lent. Il est pratiquement inhibé pour 16 p. 100 des pieds si l'humidité est normale, et pour 50 p. 100 des pieds si l'humidité est restreinte.

TABLEAU VI

Nombre de jours après le semis	Nombre de grains germés % de grains semés									
	80 % de la capacité en eau					55 % de la capacité en eau				
	7	10	13	17	21	7	10	13	17	21
Sol A. traitements :										
1	98	98	98	98	98	94	96	98	98	98
2	96	98	98	98	98	96	96	98	98	98
3	94	96	96	96	96	96	96	98	98	98
4	92	96	98	98	98	92	94	96	96	96
5	94	98	98	98	98	94	94	96	98	98
6	94	96	96	96	96	94	96	98	98	98
7	86	90	92	92	92	86	94	94	94	94
8	68	94	96	96	96	52	72	86	96	96
9	30	52	90	92	92	4	50	78	86	90
Sol B. traitements :										
1	90	96	98	98	98	80	90	94	98	98
2	92	96	96	98	98	30	96	96	96	96
3	94	98	98	98	98	76	96	98	98	98
4	92	98	98	98	98	80	98	98	98	98
5	94	98	98	98	98	80	98	98	98	98
6	96	98	98	98	98	80	98	98	98	98
7	60	96	96	96	96	2	72	94	94	94
8	18	76	96	98	98	0	30	90	94	96
9	6	20	98	98	98	0	0	32	66	72
Sol C. traitements :										
1	96	96	98	98	98	26	90	96	96	96
2	84	90	92	94	94	0	80	92	98	98
3	96	98	98	98	98	0	84	98	98	98
4	94	94	94	96	96	0	90	94	98	98
5	88	96	98	98	98	0	88	98	98	98
6	88	94	94	94	94	0	88	96	96	96
7	84	96	98	98	98	0	52	96	96	96
8	44	86	92	92	92	0	20	84	96	96
9	2	30	90	94	94	0	2	50	86	92

En comparant ces résultats avec ceux obtenus dans l'essai précédent, on constate qu'à concentration égale de la solution entourant le grain, la toxicité du biuret est sensiblement moins élevée dans le sol que sur sable.

— 10 p. 100 de dégâts constatés sur sable avec une concentration de 20 p. p. m. de biuret dans la solution, le sont dans le sol pour des concentrations de 64 à 137 p. p. m.

— Une inhibition à 50 p. 100 provoquée sur sable par une concentration de 100 p. p. m. l'est dans le sol par des taux de 134 à 196 p. p. m.

Ces différences peuvent être attribuées aux déplacements possibles

GERMINATION DU BLE SUR SOL NATUREL EN PRESENCE DE BIURET

Etat de la végétation 21 jours après le semis

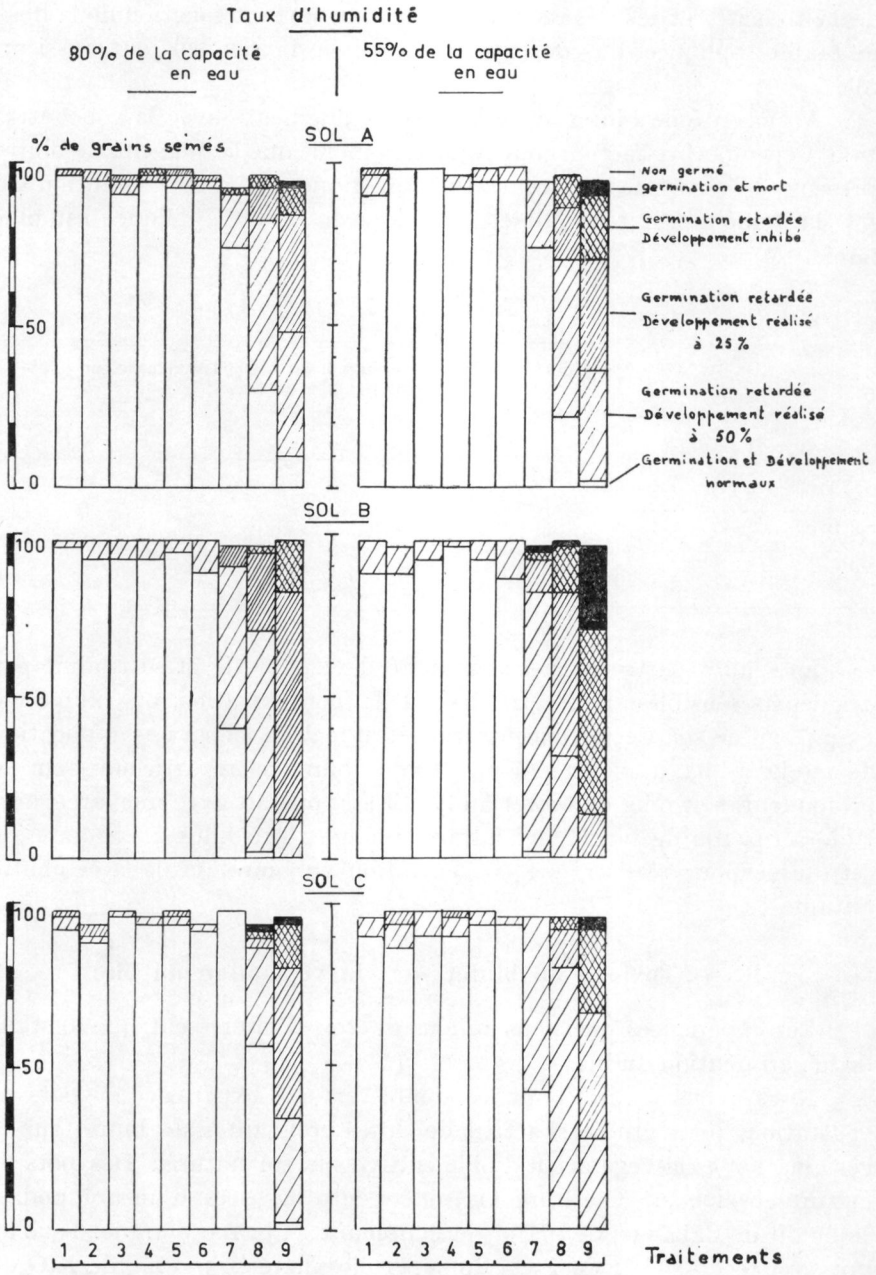


FIG. 3.

de la solution dans l'épaisseur du sol. La concentration en biuret à un point donné peut varier et le grain est moins obligatoirement en contact avec la solution que dans le sable.

On constate par ailleurs que, en présence de sol, la manifestation de la toxicité, et les dégâts provoqués sont surtout fonction de la dose de biuret appliquée. La concentration réalisée dans le sol joue aussi un rôle.

A quantité de biuret égale la toxicité augmente avec la concentration. Cependant ce facteur joue beaucoup moins que la quantité de biuret présente de sorte que a concentration théorique égale de la solution du sol, la toxicité est plus faible, si la dose de biuret appliquée est plus faible.

TABLEAU VII

Biuret p. p. m. de la solution de sol	% des pieds dont la végétation est nettement retardée ou inhibée Biuret p. p. m. de sol		
	9,3	14,8	21,2
Sol A # 90	6	18	
136		30	52
Sol B # 85	18	30	
130		68	88
Sol C # 62	4	14	
93		20	66

Le seuil à partir duquel la toxicité devient nette et se traduit par des dégâts sensibles, peut être fixé à la concentration en biuret de 15 p.p. m. de sol. Cette concentration était réalisée ici par une application de 130 kg à l'ha, d'une urée à 7 p. 100 de biuret et répartie sur 5 cm de profondeur, soit 9 kg de biuret à l'ha. Si l'on opérait avec une urée normale à 1 p. 100 de biuret il faudrait appliquer 910 kilos à l'hectare de cette urée pour réaliser une concentration en biuret égale à ce chiffre critique.

B. — Toxicité du biuret sur la végétation du blé

Les expériences que nous venons de voir n'intéressent que le stade de la germination du blé.

Nous avons réalisé, pour les compléter, une expérience en pots de végétation, pour étudier l'action de doses croissantes de biuret sur la germination et la végétation du blé cultivé sur sol naturel. Des pots de culture en zinc (modèle Burgevin) ont reçu 9 kgs secs d'un sol podzolique dit de Cabanac, de pH 5,5 et contenant 15 p. 100 d'argile. Tous les pots ont reçu 500 mg de P_2O_5, du superphosphate et 750 mg de K_2O du sulfate de potasse.

Les traitements en comparaison, à raison de 5 pots pour chacun d'eux étaient les suivants :

	Azote mg par pot	Biuret mg par pot	Biuret p. p. m. de sol	
			sur brut	sur sec
Témoin sans N	—	0	—	—
Nitrate de chaux	750	0	—	—
Urée pure	750	0	0	0
Urée à 5,6 % de biuret	750	91	8,3	10,1
Urée à 15 % de biuret	750	250	22,7	27,8

Tous les produits ont été incorporés par mélange à 8 kg de sol sec : 1 kg de sol naturel a été ensuite rajouté à la surface des pots.

Après arrosage jusqu'à une humidité de 18 p. 100 de sol brut, 19 grains par pot de blé « Fylgia » ont été semés.

Le déroulement de cette expérience mise en route le 28 mars, a permis les observations suivantes :

— Le 8 avril, soit 10 jours après le semis, un comptage des pieds levés a donné les résultats suivants :

	Pieds levés normaux	Pieds levés mais végétation en retard	Pieds non levés
Témoin	19	0	0
Urée pure	19	0	0
Urée + 91 mg Biuret	18	0	1
Urée + 250 mg Biuret	4	13	2

La végétation sur les pots à 91 mg de biuret est tout à fait normale.

Sur ceux qui ont reçu 250 mg par contre, les pieds de blé présentent un aspect rabougri et chétif. Les feuilles sont enroulées et recroquevillées sur elles-mêmes, mais ne présentent pas de coloration particulière. Quelques jours après, la plupart des pieds levés finissent par se dessécher et meurent ; ceux qui subsistent, 3 ou 4 par pot sont par contre très luxuriants.

La récolte avant maturité complète de l'essai, a donné les résultats suivants :

	Poids de matière sèche moyen par pot
Témoin	26,7 g
Nitrate de chaux	56,1 g
Urée pure	57,4 g
Urée avec 91 mg de biuret	52,7 g
p. p. d. s. à P = 0,05 : 3,4	

On peut tirer de cet essai les conclusions suivantes :

— En présence d'une fumure à base d'urée équivalant à 150 kg N/ha, le biuret à la concentration de 8 p. p. m. de sol brut à 18 p. 100 d'humidité, n'exerce aucune action décelable sur la germination ou sur le déroulement de la végétation du blé. On n'observe à aucun moment de symptômes d'intoxication de la plante. Cependant la quantité de matière sèche produite est inférieure de 8,2 p. 100 à celle obtenue avec l'urée pure, et cette différence est significative à 20 contre 1.

Cette dose correspond dans les conditions de notre essai en pots à une quantité de 18 kg de biuret à l'hectare qui seraient amenés par une application à l'ha de 325 kilos d'urée contenant 5,6 p. 100 de biuret.

A la concentration de 23 p. p. m. de sol brut, correspondant à 50 kg à l'hectare de biuret, ce produit retarde la germination et inhibe en quasi-totalité la végétation ultérieure du blé. Les plantes présentent avant de disparaître des symptômes d'intoxication nets, sous forme de malformations des feuilles.

Cet essai a été complété par les opérations et observations suivantes :

Le 5 mai, soit 38 jours après l'application du biuret au sol, on a enlevé les quelques pieds de blé subsistant sur 3 pots à 250 mg et semé à la place du sudan-grass.

On observe au moment de la levée, des symptômes d'intoxication, traduits par un aspect chétif de la végétation et quelques malformations des feuilles.

Ces symptômes sont nettement moins graves que pour le blé et les plantes ne meurent pas. Par la suite, tout symptôme disparaît et la végétation redevient normale d'aspect.

Le 7 juillet, soit 101 jours après l'application au sol, on enlève le blé subsistant sur les 2 pots restant à 250 mg de biuret, et le sudan-grass des pots précédents. On sème à la place du ray-grass anglais.

On n'observe aucun symptôme d'intoxication, ni à la levée, ni au cours de la végétation.

La toxicité du biuret ne se conserve donc pas dans le sol ; on constate qu'après 35 jours, elle s'atténue considérablement et qu'après 101 jours, elle semble avoir disparu.

Comme il est difficile d'admettre que le biuret ait été en grande partie absorbé par le blé, qu'il a intoxiqué, au cours de sa brève végétation, on tenterait de conclure que celui-ci ne se conserve pas dans le sol, mais se transforme. Cette hypothèse rejoint les conclusions de Starotska et Clark (15) à la suite de leurs observations. Cependant la transformation du biuret dans le sol sera étudiée et précisée par des essais directs ultérieurs.

C. — Toxicité du biuret sur la germination et la végétation du maïs

Aux Etats-Unis, HOFFMANN (12) a constaté qu'à la dose de 10 kg de biuret à l'hectare, les semis de maïs étaient endommagés, mais STAROSKA et CLARK (15) n'ont pas constaté d'effet toxique sur cette culture, jusqu'à la dose de 25 kg à l'hectare.

Les résultats des essais que nous poursuivons depuis plusieurs années, ont montré que l'urée était une source d'azote particulièrement intéressante dans la fertilisation du maïs, aussi bien en culture irriguée qu'en culture sèche (20) (21).

Il était donc utile de préciser la toxicité éventuelle du biuret sur le maïs, aussi bien en application au semis, qu'en cours de la végétation.

L'essai en pots suivant a été réalisé dans ce but :

Des pots de culture en zinc (modèle Burgevin) ont reçu 9 kg secs d'un sol de limon neutre de la vallée de la Garonne dosant 14,2 p. 100 d'argile. Tous les pots ont reçu 500 mg de P_2O_5 du superphosphate et 1 g de K_2O du sulfate de potasse.

L'essai est divisé en deux séries :

1re *série :*

On étudie l'action du biuret à doses croissantes, appliqué *avant le semis* du maïs, soit en présence d'urée, soit en présence de nitrate d'ammoniaque.

Les traitements en comparaison étaient les suivants, à raison de 2 pots, pour chacun.

	Azote mg p/pot	Biuret mg p/pot	Biuret p.p.m. du sol		Correspondant à une urée appliquée à 310 kg. à l'ha et qui contiendrait
			s/brut	s/sec	
Biuret dose					% de biuret
0....	700	0	0	0	0
1....	700	10,5	1,1	1,3	0,66
2....	700	37	3,8	4,6	2,40
3....	700	68	7,0	8,5	4,40
5....	700	153	15,8	19,1	10,0
6....	700	312	32,2	39,0	20,0

Les produits ont été incorporés par mélange à la totalité de la terre.

Après arrosage jusqu'à une humidité de 17,5 p. 100 du sol brut, 5 grains de maïs hybride WF9 × M14 ont été semés par pot, le 29 mai.

Le déroulement de l'expérience a permis les observations suivantes :

Des symptômes d'intoxication apparaissent dès la levée pour les deux doses les plus élevées 5 et 6.

Ils se traduisent par un retard de la germination et de la levée, et surtout de la croissance, beaucoup plus accentué à 312 mg qu'à 153. Pour la dose 6 à 312 mg de biuret par pot le maïs qui a germé, ne se développe pas ; au bout de quelques jours, il se dessèche et meurt, aussi bien en présence d'urée que de NH_4NO_3. A la dose de 153 mg, le développement végétatif s'effectue, mais est retardé. Le nombre de feuilles qui se développent sur chaque pied est normal, mais la plante ne s'allonge pas et les feuilles sont tassées les unes sur les autres en forme de bouquet; la plante reste naine. De plus, ces feuilles sont enroulées sur elles-mêmes ; leur tissu est gaufré ; elles présentent des dentelures sur les bords, mais pas de coloration particulière. Les racines elles aussi ont subi des modifications ; les racines principales sont plus grosses et plus courtes, mais le chevelu des radicelles est beaucoup moins développé.

Tous ces symptômes d'intoxication sont les mêmes et présentent la même gravité en présence d'urée aussi bien que de nitrate d'ammoniaque accompagnant le biuret.

Aucun symptôme n'apparaît, ni à la germination, ni en cours de végétation pour les doses plus faibles de biuret.

2e *série :*

On a voulu tester l'action du biuret appliqué en cours de végétation sur le maïs. Les pots ont été remplis en même temps que ceux de la première série avec addition de la fumure phospho-potassique et le maïs semé à la même date. Le 26 juin, soit 1 mois après le semis, le maïs ayant 6 feuilles et 40 cm de haut, on lui a appliqué des doses croissantes de biuret, soit en présence d'urée, soit en présence de NH_4NO_3. Les produits ont été apportés en solution par arrosage des pots en surface.

Les traitements étaient les suivants :

	Azote mg p/pot	Biuret mg p/pot	Biuret p. p. m. dans la solution d'arrosage	Biuret p. p. m. du sol brut en répartition uniforme	Correspondant à une urée appliquée à 310 kg à l'ha et qui contiendrait
Dose 0.....	700	0	0	0	0 % de biuret
» 1.....	700	10,5	52	1,1	0,66 »
» 2.....	700	37	185	3,8	2,40 »
» 3.....	700	68	340	7,0	4,40 »
» 4.....	700	106	530	10,9	7,0 »
» 5.....	700	153	765	15,8	10,0 »
» 6.....	700	312	1 560	32,2	20,0 »

Aucun symptôme de toxicité sur la végétation n'est apparu à aucun moment, jusqu'à la dose 5.

Pour la dose 6 à 312 mg de biuret par pot, on a observé après un certain temps, un développement plus faible, mais aucune malformation des feuilles.

On peut tirer de cet essai les conclusions suivantes :

En présence d'une fumure azotée normale, aussi bien à base d'urée que de nitrate d'ammoniaque, le biuret appliqué au sol avant semis, n'exerce aucune action toxique décelable, jusqu'à la concentration de 7 p. p. m. de sol brut. Cette dose correspond dans les conditions de notre essai en pots à 14 kg de biuret à l'ha.

A la concentration de 15,8 p. p. m., correspondant à 31 kg à l'ha, le biuret n'inhibe pas la germination, ni la végétation du maïs mais provoque cependant dans la plante des troubles qui se manifestent par des déformations morphologiques de la partie aérienne et des racines.

A la concentration de 32 p. p. m. de sol brut, soit 62 kg à l'ha en produit pur, le biuret n'inhibe pas totalement la germination, mais entrave toute végétation ultérieure.

Par contre, appliqué sur un maïs en cours de végétation, le biuret n'exerce aucune action toxique décelable jusqu'à la concentration maxima de 32 p. p. m. de sol.

Cet essai sur maïs a été complété par les opérations suivantes :

Le 26 juin, 29 jours après l'application du biuret au sol, on a resemé du maïs sur les pots ayant reçu 312 mg et sur un pot à 153 mg de biuret.

On n'a observé aucun symptôme de toxicité, à aucun moment, pour la dose de 153 mg.

Pour la dose de 312 mg après un retard de développement au début, la végétation est devenue tout à fait normale et il n'y a pas eu de malformation sur la plante.

Le maïs semé la première fois sur les pots, a, nous l'avons vu, disparu tout de suite après sa germination ; il n'a donc pu absorber qu'une faible quantité de biuret.

On peut en conclure, avec plus de netteté encore que pour le blé, que le biuret s'est transformé dans le sol. Pour que toute toxicité nette disparaisse, les observations précédentes nous amènent à penser que les 2/3 du biuret présent ont disparu au cours d'une période de 30 jours.

D. — Toxicité du biuret sur la végétation de la pomme de terre

1° **Essais de plein champ** (Bretagne).

Au printemps de 1957, 21 essais de formes d'azote sur pommes de terre, ont été mis en place dans le Morbihan. Le bureau du SPIEA de Rennes, la direction des Services Agricoles, la Fédération Nationale des Producteurs de Plants de Pommes de Terre, et la Délégation d'Angers des Recherches Agronomiques de l'O. N. I. A. ont collaboré à l'installation et au contrôle de ces essais.

Ils étaient tous du type « essais démonstratifs » sans répétitions et à 3 traitements. On y comparait l'engrais azoté classique en culture de

pommes de terre, le sulfate d'ammoniaque à la dose de 30 unités d'azote à l'ha, avec l'urée aux 2 doses de 30 et 60 unités d'azote.

Les plantations furent faites entre le 10 et le 20 avril et le mois qui suivit fut anormalement sec pour la Bretagne.

— Des jaunissements de feuilles anormaux furent remarqués sur quelques-unes des parcelles fertilisées à l'urée, quelquefois dès la levée, en général 8 à 10 jours après, et dans 1 cas, 3 semaines après.

Ils furent visibles pendant 15 à 20 jours, affectèrent les feuilles en développement pendant cette période, tandis que celles formées après furent normalement vertes. Les feuilles atteintes présentaient des taches jaune franc de chaque côté de la nervure centrale, le plus souvent vers le haut de la feuille, parfois seulement sur les bords du limbe.

Le 10 juillet, avant brûlage des fanes, la végétation était identique sensiblement sur les parcelles sulfate d'ammoniaque et sur les parcelles urée à dose 30 ; elle était nettement plus verte pour l'urée à dose 60.

La récolte finale donna les résultats suivants :

Ensemble des 21 champs d'essais

	Rendement total en tonnes à l'ha	
	Engrais en plein avant plantation (15 champs)	Engrais localisés à la plantation (6 champs)
Sulfate d'ammoniaque 30 kg N/ha	23,0	30,9
Urée 30 kg N/ha	23,2	30,9
Urée 60 kg N/ha	23,9	30,2

Les différences observées entre les traitements urée ou sulfate ne sont pas significatives.

Les engrais localisés paraissent plus efficaces que les engrais en plein mais une conclusion ne saurait être tiré de cette comparaison les champs n'étant pas les mêmes pour les deux traitements.

En 1957, également, un essai de formes d'azote sur pommes de terre a été réalisé par la Coopérative de Landernau à Milizac dans le Finistère. On y comparait avec 4 répétitions, le sulfate de NH_4, l'ammonitre et l'urée à la dose de 70 kg N/ha, apportées sur toute la surface au moment de la plantation.

La levée a été régulière et identique sur tous les traitements.

15 jours après, des jaunissements ont apparu sur les feuilles des parcelles urée, analogues à ceux déjà décrits ; ils ont subsisté 15 jours environ puis ont disparu.

A la récolte, les 3 traitements ont donné des résultats identiques :

Témoin sans azote	12,5	tonnes/ha
Urée	17,2	»
Sulfate de NH_4	17,3	»
Ammonitre	17,5	»

Sans être graves puisque les rendements sont finalement identiques ces troubles de végétation avaient inquiété les agriculteurs et les contrôleurs de plants de semence.

Différentes hypothèses pouvaient être avancées à l'époque pour expliquer les phénomènes constatés. Parmi celles-ci l'intoxication par le biuret pouvait être retenue puisque une analyse nous apprit que l'urée utilisée dans ces essais dosait près de 4 p. 100 en biuret.

Il faut noter que le printemps et l'été furent anormalement secs en 1957, dans le Morbihan. Il est possible que cela ait influencé l'apparition et la gravité des phénomènes constatés.

En 1958, afin de préciser la cause des phénomènes constatés l'année précédente, des essais précis ont été installés en collaboration avec la Fédération Nationale des producteurs des plants de pommes de terre.

Ils étaient situés à Pluméliau et à Confort St-Thuriau, dans le Morbihan. Les sols de ces terrains d'essais dosaient respectivement 13,1 p. 100 et 13,5 p. 100 d'argile et 6,5 p. 100 et 4,9 p. 100 de matière organique ; leurs pH étaient de 5,5 et 5,4.

La fumure phospho-potassique était de 130 kg de P_2O_5 du super et 180 kg de K_2O de la sylvinite dans le premier essai ; de 100 kg de P_2O_5 du super et 180 kg de K_2O du chlorure dans le second. Les traitements en comparaison étaient :

A : Sulfate de NH_4 localisé dans la raie à la plantation

B : Urée à 0,5 p. 100 de biuret localisé dans la raie à la plantation

C : Urée à 2,2 p. 100 de biuret localisé dans la raie à la plantation

D : Urée à 2,2 p. 100 de biuret en surface, 8 jours avant la plantation.

Tous les traitements étaient réalisés pour 1 dose de 40 kg d'azote à l'hectare et comportaient 6 répétitions.

De plus, une parcelle hors essai avait reçu 40 kg N/ha d'une urée artificiellement enrichie en biuret, jusqu'au taux de 20 p. 100.

Un mois après la plantation, soit vers le 15 mai, le traitement ayant reçu l'urée sur toute la surface 8 jours avant plantation, étaient le plus beau. Cet avantage s'estompa par la suite.

A cette même date, quelques taches jaunes apparurent sur les feuilles dans les parcelles avec urée localisée à 2, 2 p. 100 de biuret. Ces symptômes restèrent minimes et ne se remarquaient pas lors d'un examen superficiel. Ils n'étaient pas comparables, ni en étendue, ni en intensité, à ceux observés en 1957. L'écart de pluviosité entre le printemps 1957 anormalement sec et celui de 1958, peut expliquer cette différence.

Par contre, l'urée à 20 p. 100 de biuret provoqua une abondante et intense coloration jaune des feuilles.

Aucun symptôme n'apparut pour l'urée à 0,5 p. 100 de biuret.

La récolte donna les résultats suivants :

	Récolte totale en tonnes/ha	
	Plumeliau	Confort St-Thuriau
A. Sulfate de NH_4 localisé	28,8	24,2
B. Urée 0,5 % biuret localisée	28,4	22,8
C. Urée 2,2 % biuret localisée	27,3	23,3
D. Urée 2,2 % biuret 8 jours avant la plantation	27,7	22,6
p. p. d. s. à P = 0,05	± 2,7	± 1,9

Il n'y a pas de différence significative entre les traitements qui se révèlent tous équivalents.

Les quelques colorations jaunes observées sur le traitement C n'ont pas provoqué de diminution sensible du rendement.

A l'inverse, l'avance de végétation prise au départ par le traitement D ne s'est pas répercutée sur la récolte.

Il semble donc certain que le biuret présent dans l'urée soit à l'origine des colorations jaunes observées sur les feuilles de pommes de terre fertilisées avec cet engrais. L'apparition de ces symptômes semble par ailleurs dépendre de la concentration en biuret réalisée dans le sol, ou dans la solution de sol, au voisinage immédiat du tubercule.

2° Essais en pots à la Station de Toulouse

A la suite des observations réalisées dans les essais de plein champ en Bretagne — et que nous venons d'examiner — nous avons voulu préciser la toxicité du biuret sur la pomme de terre, par un essai en pots.

Nous avons conservé pour cette expérience, sinon les conditions de climat, du moins celles du sol original, et essayé de reproduire les conditions de localisation de la fumure d'usage courant en Bretagne.

Des pots de culture en matière plastique, ont été remplis de 8 kg décomptés en sec d'un sol provenant de Confort Saint-Thuriau dans le Morbihan.

Rappelons que sur ce même sol a été réalisé un essai de plein champ en 1958.

On a comparé l'action des doses croissantes de biuret en présence d'urée et en application localisée.

4 kg de terre sèche sans engrais étaient d'abord placés dans le pot.

On incorporait les engrais à 2 kg de sol sec que l'on ajoutait ensuite et on plaçait un plant de pomme de terre au milieu de cette tranche de sol. On ajoutait enfin 2 kg de terre par-dessus.

Tous les pots ont été amenés ensuite à une humidité de 26 p. 100 de sol brut.

Les traitements en comparaison étaient les suivants, à raison de 2 pots pour chacun.

	mg par pot		p. p. m. de sol sur brut		Correspondant à de l'urée appliquée à raison de 350 kg à l'ha et contenant
	Azote	Biuret	Azote	Biuret	
Témoin	0	0	0	0	0
Biuret dose 0 .	800	0	296	0	0 % de biuret
1 .	—	11	—	4,1	0,62 % —
2 .	—	39	—	14,5	2,23 % —
3 .	—	78	—	29,0	4,40 % —
4 .	—	175	—	65,0	10,00 % —

Le déroulement de cet essai mis en route, le 30 avril, a permis les observations suivantes :

Le 13 mai, quelques jours après la levée, des taches jaunes apparaissent à la base des jeunes feuilles pour la dose la plus élevée en biuret : 175 mg par pot.

Le 21 mai, la coloration jaune s'accentue et tend à envahir toute la feuille en remontant le long des bords. Le jaunissement cependant n'atteint pas toutes les feuilles, mais seulement celles de la base ; les nouvelles qui se forment sont normalement vertes.

Par ailleurs, on observe un retard de végétation marqué par rapport aux autres traitements : les fanes présentent un port plus trapu, plus ramassé.

A la même date, quelques taches jaunes peu étendues apparaissent sur la dose de 78 mg de biuret, mais le développement végétatif de ce traitement est tout à fait normal.

Le 23 mai, la coloration diminue d'intensité sur la dose 175 mg. Par contre, elle apparaît sur de nouvelles feuilles, mais cette fois à la pointe.

Le 27 mai, le jaunissement s'estompe de plus en plus. La végétation s'est beaucoup développée durant les jours précédents et le retard constaté jusque-là est pratiquement comblé.

Les jaunissements très localisés et minimes apparus sur la dose 78 mg ont complètement disparu.

Le 2 juin, sur la dose 175, seules restent jaunes quelques feuilles basses. Ces feuilles finissent pas se dessécher et tomber. L'ensemble des fanes présente un aspect et une coloration normales. Il y a identité de végétation pour tous les traitements sauf le témoin sans azote.

On effectue la Récolte le 27 juin. Les résultats en poids frais de tubercules par pot sont :

Témoin sans N : 176
Biuret dose 0 : 202
— — 1 : 197
Biuret dose 2 : 204
— — 3 : 203
— — 4 : 153

P. p. d. s. à 20 contre 1 : 36.

On peut conclure de cet essai que le Biuret exerce une action toxique sur la végétation de la pomme de terre, à partir ou au-dessus d'une concentration de 29 p. p. m. de sol à 26 p. 100 d'humidité. Cette concentration correspond, à une densité de 50 000 pieds à l'ha à la localisation autour du plant de pommes de terre de 4 kg de biuret à l'ha. Cette toxicité se manifeste, d'une part par un retard de végétation au début du développement, mais surtout par une coloration jaune canari des feuilles.

Le jaunissement apparaît immédiatement après la levée. Il atteint les feuilles en voie de développement pendant une période de 15 jours environ, en affectant la base, le bord et la pointe des feuilles. Celles qui se développent par la suite sont normalement vertes.

A la concentration de 29 p. p. m., les symptômes sont très localisés et fugaces et le rendement final n'est pas affecté.

A la concentration de 65 p. p. m. soit 9 kg de biuret à l'hectare, ils sont très nets.

Par comparaison avec le blé ou le maïs, on remarque que la pomme de terre supporte des concentrations environ deux fois plus élevées avant de manifester des troubles. Elle ne présente pas de malformation, mais surtout elle surmonte son intoxication.

En effet, même à la concentration très élevée de 65 p. p. m. et après avoir manifesté une intoxication de manière très spectaculaire, la végétation redevient normale sinon le rendement.

E. — Toxicité du biuret par application en pulvérisations foliaires

C'est par cet aspect que la toxicité du biuret a été signalée pour la première fois en 1953 par JONES et STEINOCKER (1). Par la suite, de nombreux auteurs américains ont signalé le phénomène et le terme de « yellow-tip » employé pour désigner le jaunissement provoqué sur les feuilles est maintenant très connu.

D'après ces travaux, il semble que les citrus soient de loin les plus sensibles, puisque OBERBACHER (3) a constaté un jaunissement fugace pour 45 p. p. m. de biuret dans la solution pulvérisée. Les autres espèces végétales par contre semblent pouvoir supporter sans dommages, des concentrations beaucoup plus élevées.

L'urée, produit très soluble, et bien toléré par le feuillage, se prête particulièrement à l'emploi en pulvérisations et cette pratique est très séduisante. Elle permet d'intervenir à des périodes où les modes classiques de fumure seraient mis en échec.

Associée avec les traitements anticryptogamiques, elle permet d'appliquer, aux moindres frais, un supplément d'alimentation, et de régu-

lariser la nutrition azotée pour les vignes, les arbres fruitiers, les cultures maraîchères et florales.

En liaison ou non avec les traitements herbicides, elle permet d'appliquer aux céréales et aux prairies, une véritable fumure azotée avec une grande régularité.

Ces diverses techniques ont fait l'objet depuis quelques années, d'un grand nombre d'essais, tant à l'Étranger qu'en France. Devant les résultats obtenus, elles tendent à se généraliser de plus en plus maintenant dans la pratique agricole.

Encore faut-il que le biuret présent dans l'urée ne provoque pas de réactions désagréables, ou n'annule pas, par une éventuelle toxicité, le bénéfice escompté de l'opération.

Nos essais de pulvérisations d'urée sur *blé* associées à des traitements herbicides n'ont pas révélé d'effets toxiques du biuret ni sur la végétation, ni sur le rendement. On a utilisé dans ces essais des solutions dosant jusqu'à 25 p. 100 d'urée à 2 p. 100 de biuret ; soit une concentration en biuret de 5 000 p. p. m. dans le liquide pulvérisé.

Au cours de nombreux essais de pulvérisations d'urée sur *vigne*, combinées avec les traitements anticryptogamiques, nous n'avons constaté aucun symptôme de toxicité pouvant être attribué au biuret. Les solutions utilisées dosaient 0,7 p. 100 d'urée pouvant contenir jusqu'à 2 p. 100 de biuret, soit une concentration de 140 p. p. m.

Sur les *arbres fruitiers*, nous avons réalisé l'expérience suivante :

Des *pêchers*, variété Amsden, greffés sur franc, âgés de 9 ans et présentant un développement végétatif normal, ont été pulvérisés avec les solutions suivantes :

Urée %	Biuret		
	% dans l'urée	p. p. m. dans la solution	g par arbre à chaque pulvérisation
0,500	0	0	0
0,500	0,5	25	0,150
0,500	2,0	100	0,600
0,500	4,0	200	1,200
0,750	0,5	37,5	0,225
1,000	0,5	50	0,300
1,000	2,0	200	1,200
1,000	4,0	400	2,400

On a réalisé trois pulvérisations successives le 18 avril, le 15 mai et le 23 mai, à raison de 6 litres par arbre chaque fois. Nous n'avons pas constaté à la suite de ces traitements, de jaunissement sur les feuilles, ni aucun autre symptôme d'intoxication quelconque.

Par ailleurs, une plantation de *poiriers* William, greffés sur cognas-

siers d'Angers, et plantés à la Station de Toulouse en 1952, reçoit régulièrement des pulvérisations d'urée.

On a effectué en 1956, de mars à juillet, 7 applications à 0,7 p. 100 d'une urée dosant 2,2 p. 100 de biuret, soit une concentration en biuret de 154 p. p. m. dans la solution pulvérisée, et 30 mg de biuret appliqué par arbre, à chaque fois. Aucune manifestation de toxicité n'est apparue sur les feuilles.

En 1956, la récolte a été anéantie par les gelées de printemps.

En 1957, les pulvérisations ont été reprises avec une urée dosant 0,6 p. 100 de biuret, soit 42 p. p. m. dans la solution. Aucun symptôme d'intoxication n'a été constaté. Au contraire, l'urée a procuré une majoration significative de rendement de 1,6 tonne à l'ha, soit 14 p. 100.

Par contre, l'Institut des Fruits et Agrumes coloniaux (I. F. A. C.), dans sa station de Guinée, comme dans sa délégation en Corse, opérant sur la demande de l'O. N. I. A., a pu mettre en évidence des symptômes d'intoxication sur *orangers*, analogues à ceux déjà signalés par les Américains. Pour les applications foliaires sur citrus, il semble bien que la teneur de l'urée en biuret doive descendre au-dessous de 0,5 pour cent.

III. — BIURET ET POUVOIR ABSORBANT DU SOL. DÉPLACEMENT SOUS L'INFLUENCE DE L'EAU INFILTRÉE

Cette question ne semble pas avoir été considérée par la plupart des auteurs qui ont étudié les effets du biuret sur la végétation ou son évolution dans le sol.

Certains auteurs toutefois paraissent admettre la possibilité d'accumulation du biuret dans le sol, à la suite de fumures répétées à l'urée.

VAIDYANATHAN, COKKANA et NORAYANAN (6) ont constaté sur caféiers l'apparition de symptômes de toxicité attribués au biuret après 4 ans de traitements à l'urée granulée.

DROSDORFF et ses collaborateurs (9) attribuent également au biuret les symptômes apparus sur des tungs (Aleurites) recevant de l'urée depuis 5 ans. « Le biuret ou quelque autre substance toxique — disent-ils — s'accumulait dans le sol et semblait relativement immobile. »

Plusieurs auteurs ont signalé, et nous-mêmes avons constaté que l'urée n'était pas retenue par le pouvoir absorbant du sol (22) tant qu'elle n'était pas transformée en gaz carbonique et ammoniac. On peut penser par analogie que la molécule de biuret n'est pas absorbée par les colloïdes et pourra être entraînée par les eaux infiltrées.

L'expérience suivante a été réalisée pour vérifier cette hypothèse :

Des allonges de 4 cm de diamètre ont été remplies de terre sur 10 cm d'épaisseur. Les sols utilisés avaient des taux d'argile variant de 7 à

55 p. 100. Ces sols furent humidifiés jusqu'à saturation et on ajouta en surface sur chaque allonge, 20 mg de biuret en solution. Après 48 heures, les colonnes de sol furent lessivées par 100 cc d'eau, ce qui correspondrait à 80 mm de pluie. Le biuret fut dosé dans l'eau percolée. La quantité de 20 mg de biuret par allonge correspondrait à une application de 160 kg à l'ha. Cette dose qui peut paraître importante, a été commandée par les impératifs du dosage colorimétrique dans le percolat.

Les résultats furent les suivants :

Origine des sols utilisés	Teneur en argile %	Biuret retrouvé dans le percolat % du biuret introduit
Mageste	7	67
Thibaut	14	77
Mondonville	16	78
Cabanac	28	72
Gimat	38	77
Auterive	55	68

On constate qu'après 48 heures de contact avec le sol, le biuret se retrouve aux 3/4 dans l'eau de lessivage. La quantité de biuret lessivée est pratiquement indépendante de la teneur en argile du sol.

Une seconde expérience a été réalisée selon le même mode opératoire mais avec 2 doses de biuret : 10 mg par allonge, correspondant à une application de 80 kg à l'ha et 20 mg comme précédemment. On a effectué 2 lessivages successifs de 100 cc à 48 h d'intervalle.

Sols utilisés	Teneur en argile %	Doses de biuret	Biuret retrouvé dans le percolat % du biuret introduit		
			1er lessivage	2e lessivage	Total
Sol argilo-calcaire .	18,0	10 mg	100	—	100
		20 mg	100	—	100
Sol argilo-calcaire .	37,5	10 mg	93	5	98
		20 mg	67	31	98

On constate que pour le premier sol, l'équivalent de 80 mm de pluie a suffi pour lessiver complètement le biuret sous 10 cm de sol.

Il en est pratiquement de même dans le second sol pour 10 mg de biuret. Pour 20 mg par contre, il a fallu un second lessivage de 80 mm pour entraîner complètement le biuret, et nous rejoignons ici les résultats de la première expérience.

On peut tirer de ces résultats la conclusion que le biuret n'est pas retenu par le pouvoir absorbant du sol.

Produit soluble, il passera dans la solution du sol et pourra suivre le mouvement des eaux d'infiltration. Il pourra donc être entraîné vers

le sous-sol par les eaux de drainage et sortir de la zone explorée par les racines.

Il est logique de penser que cette migration suivra la même loi que celle des nitrates. Des travaux antérieurs nous ont permis de vérifier celle-ci dans les conditions de sol et de climat de la région toulousaine. Pour la période hivernale la migration vers le bas est de 1 cm de descente pour 3 mm de pluie environ.

Il est donc tout à fait improbable que les quantités de biuret apportées dans le sol par les fumures à l'urée et qui sont hors de proportion avec les quantités utilisées dans nos essais, puissent se conserver d'une année sur l'autre et s'accumuler dans les couches superficielles du sol.

Les précipitations atmosphériques d'un climat normalement arrosé et à plus forte raison la pratique de l'irrigation, provoqueront leur migration vers le sous-sol et leur lessivage. Ce lessivage sera d'autant plus rapide que le sol sera moins épais. Même dans le cas de sols très profonds, le biuret doit, sous nos climats tempérés sortir en 1 an de la zone d'absorption radiculaire. Sous climats secs ou à forte évaporation, ce lessivage peut demander plus d'un an. Mais même dans ce cas, l'accumulation du biuret à un niveau donné serait difficilement réalisable, la première période pluvieuse l'entraînant en totalité.

IV. — HYDROLYSE ET NITRIFICATION DU BIURET DANS SLE OL

La majorité des chercheurs qui se sont occupés du biuret constatent que la toxicité de ce composé diminue avec le temps quand il est incorporé au sol et varie avec les conditions de climat.

Funabiki et ses collaborateurs constatent que les phénomènes toxiques sont moins accusés en été qu'en hiver (10) (11) ; Rai, Hamner et Cook observent des dégâts plus ou moins importants suivant les types de sol (8).

Staroska et Clark (15) confirment que les seuils de toxicité semblent dépendre des conditions de température. Ils observent que le biuret perd sa toxicité après un certain temps de séjour dans le sol et devient alors une source d'Azote valable. Ces auteurs ont, de plus, étudié la nitrification du biuret dans le sol. Ils constatent qu'en étuve à 30°C, celui-ci nitrifie moins vite que l'urée ou le sulfate d'ammoniaque, mais qu'au bout de 15 semaines, le taux de nitrification de ces trois produits, ainsi que celui d'urées plus ou moins chargées en biuret est identique.

Nous avons vu précédemment dans notre essai en pots sur blé, que la toxicité du biuret s'atténuait beaucoup 35 jours après l'application au sol, et disparaissait après 101 jours. Il en était de même après 30 jours, dans notre essai en pots sur maïs.

Ces constatations ne peuvent s'expliquer que par une transformation du biuret dans le sol.

Cependant nous avons voulu étudier directement l'hydrolyse et la nitrification du biuret. Les essais que nous allons considérer maintenant ont eu pour but :

— d'une part, de préciser la vitesse d'hydrolyse et de nitrification du biuret seul, soit à l'étuve à 28°C soit dans les conditions naturelles de température du sol en place.

— d'autre part, d'étudier l'action possible du biuret sur l'hydrolyse et la nitrification de l'urée, également à l'étuve et à la température extérieure.

Chacun de ces essais a été réalisé dans différents types de sols.

A. — Hydrolyse et nitrification du biuret seul

1° En Étuve à 28°C

L'essai a été réalisé dans 2 sols différents :

— un sol de limon profond décalcifié de la vallée de la Garonne, de bonne fertilité à pH 6,5 ;

— un sol argilo-calcaire pauvre, de coteau, dosant 16,5 p. 100 de CO_3Ca.

Les sols ont été prélevés immédiatement avant l'essai.

Pour chaque terre, on établit autant de séries de flacons que de traitements en comparaison, contenant chacun 50 g de sol sec.

Les produits à tester sont mélangés à ces 50 g de terre, que l'on amène ensuite à une humidité optima.

Les flacons sont mis à l'étuve à 28°C et l'humidité est rétablie régulièrement au taux initial.

A intervalles réguliers, on retire 1 ou 2 flacons de chaque série.

Le sol est épuisé par une solution normale de chlorure de calcium, et on dose l'Azote ammoniacal et nitrique présent.

Par déduction de l'Azote minéral trouvé dans le témoin, on juge de l'azote ammonisé ou nitrifié à partir du produit à l'essai.

Les traitements en comparaison étaient les suivants :

	mg introduits par kg de sol sec	
	Azote	Biuret
Témoin	—	—
Sulfate de NH_4	200	—
Biuret dose 1	50	125
Biuret dose 2	100	250

Les résultats sont donnés au tableau VIII et figurés au graphique 4.

TABLEAU VIII

	Biuret minéralisé en mg par kg de terre							
Nombre de jours.....	7	14	21	28	43	57	76	106
Sol de limon								
Biuret dose 1 = 125 mg.....	0	0	16	21	66	85	120	121
Biuret dose 2 = 250 mg.....	0	0	0	25	65	142	213	225
Sol argilo-calcaire								
Biuret dose 1 = 125 mg.....	0	0	11	19	46	73	100	104
Biuret dose 2 = 250 mg.....	0	0	0	27	82	115	150	205

Ces résultats permettent les conclusions suivantes :

Le biuret appliqué aux doses indiquées s'hydrolyse et nitrifie dans le sol en étuve à 28°C.

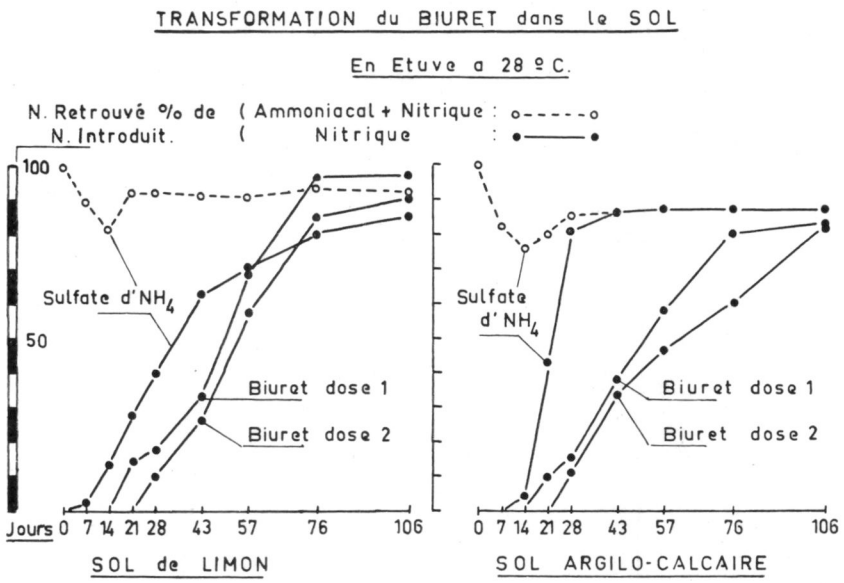


FIG. 4.

Dans les deux types de sol utilisés, la nitrification suit immédiatement l'hydrolyse. Elle débute après 14 jours d'incubation pour la dose de 125 mg par kg de terre et après 21 jours, pour la dose de 250 mg. Ce léger décalage peut s'expliquer par une intoxication passagère des bactéries hydrolysantes, dépendant de la dose, mais en tout cas de courte durée.

En sol de limon, le taux de nitrification du biuret est identique à celui du sulfate d'ammoniaque au bout de 57 jours pour la dose 1, et de

72 jours pour la dose 2. Il est pratiquement de 100 p. 100 à 76 jours pour la dose 1 et à 106 jours pour la dose 2 et dépasse alors celui du sulfate de NH_4.

En sol argilo-calcaire, il est de 83 p. 100 et pour les deux doses après 106 jours d'incubation.

Les concentrations utilisées dans cet essai sont très élevées, et dépassent largement les seuils de toxicité physiologique observés précédemment pour les plantes.

Cependant et malgré ces doses massives, les bactéries hydrolysantes et nitrifiantes ne sont pas intoxiquées ou du moins très passagèrement et la nitrification du biuret s'effectue.

2° A la température extérieure en hiver

L'essai a été réalisé dans 3 types de sols :

— un sol de boulbène des alluvions récentes de la Garonne, acide, à pH 5 et peu fertile ;

— un sol de limon à pH 6,5 — utilisé dans l'essai précédent ;

— un sol argilo-calcaire des coteaux à pH 7,5, ne renfermant que des traces de CO_3Ca et de fertilité moyenne.

La technique expérimentale était analogue à celle décrite précédemment, mais les flacons contenaient 200 g de sol sec.

Après remplissage et humectation, ils furent enfouis jusqu'au goulot dans le sol à l'extérieur.

Le départ de l'essai a eu lieu en hiver le 3 janvier.

Les traitements en comparaison étaient les suivants :

	mg. introduit par kg de sol sec	
	Azote	Biuret
Terrain	—	—
Sulfate de NH_4	100	—
Biuret	100	250

Les résultats sont donnés au tableau IX et figurés au graphique 5.

TABLEAU IX

Nombre de jours	Biuret minéralisé en mg par kg. de terre										
	5	10	17	24	36	51	78	106	136	176	216
Sols à											
pH : 5,0	0	0	0	0	0	0	17	37	60	100	158
pH : 6,5	0	5	12	18	25	45	63	70	88	145	238
pH : 7,5	0	0	7	10	13	20	40	68	88	145	243

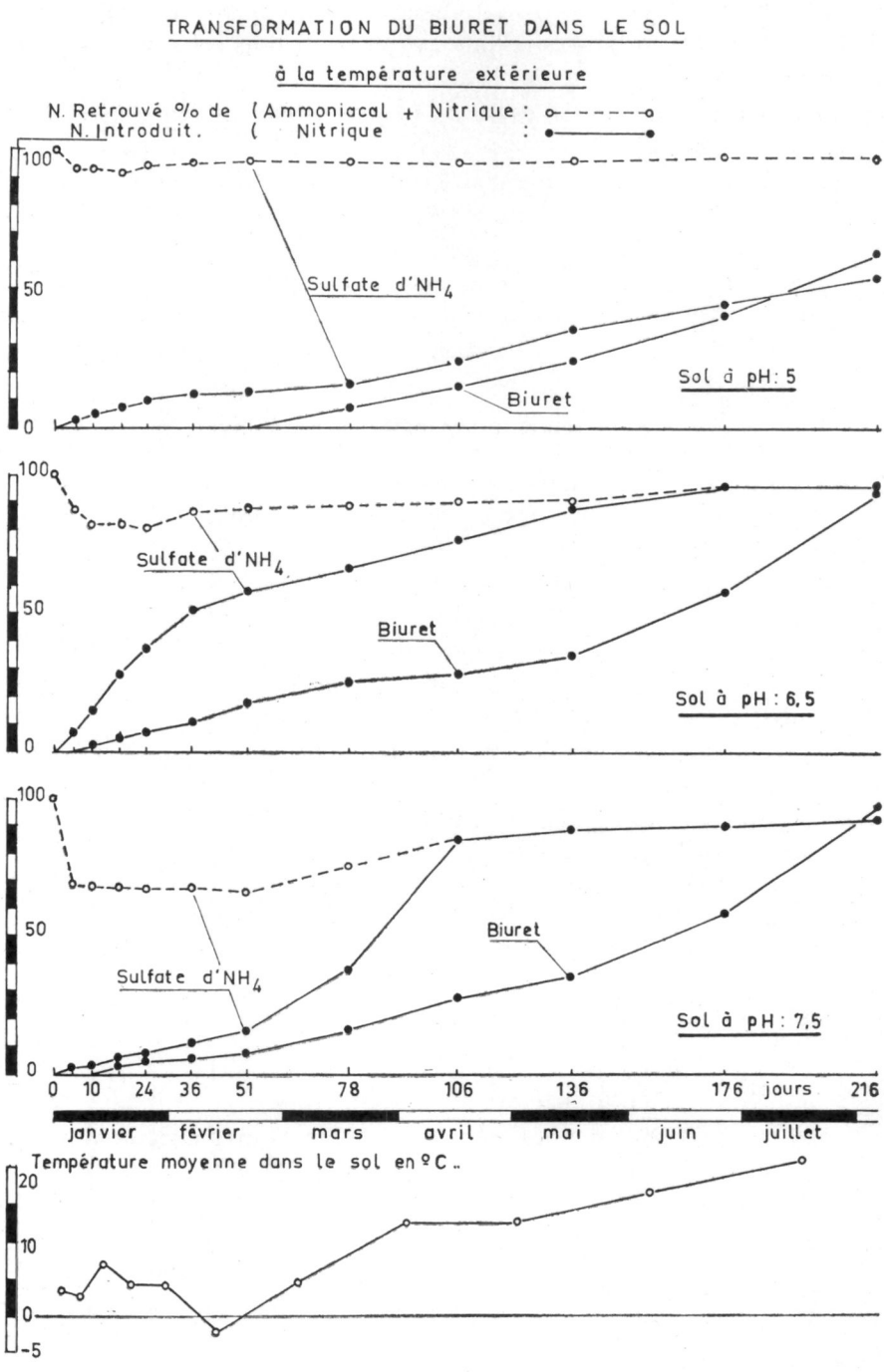

TRANSFORMATION DU BIURET DANS LE SOL
à la température extérieure
N. Retrouvé % de N. Introduit. (Ammoniacal + Nitrique :
(Nitrique :
100
50
0
Sulfate d'NH4
Biuret
Sol à pH: 5
Sol à pH: 6,5
Sol à pH: 7,5
0 10 24 36 51 78 106 136 176 jours 216
janvier février mars avril mai juin juillet
Température moyenne dans le sol en °C.
20
10
0
-5

FIG. 5.

Ces résultats montrent que le biuret s'hydrolyse et nitrifie dans le sol, aux conditions naturelles de température.

Dans les trois types de sols utilisés, la nitrification suit immédiatement l'hydrolyse et comme nous l'avions déjà observé en étuve, ne débute qu'après un certain temps d'incubation. Ce retard est faible pour les sols à pH 6,5 et 7,5 (5 et 10 jours). Il peut atteindre 51 jours dans un sol peu fertile, à faible activité microbienne soumis à une température assez basse.

Les températures observées dans le sol au début de notre essai furent très basses. Cette période coïncide en effet avec un hiver anormalement rigoureux pour la région Toulousaine.

Malgré ces conditions sévères le biuret s'hydrolyse et nitrifie cependant, mais plus lentement qu'en étuve. Pour le sol de pH 6,5 : 28 p. 100 du biuret introduit ont nitrifié à 106 jours, contre 90 p. 100 dans le même temps à 28°C.

Par la suite, quand la température du sol se relève à partir du mois de mai, la nitrification s'accélère. Après 216 jours de présence dans le sol, le biuret est totalement nitrifié dans les 2 sols de pH 6,5 et 7,5. Il est nitrifié à 63 p. 100 seulement dans le sol à pH 5,0 (le sulfate d'ammoniaque dans le même temps n'est nitrifié qu'à 54 p. 100) et notre essai n'a pas été poursuivi au-delà. Cependant on ne voit pas de raison pour que le phénomène s'arrête et l'on peut penser que la nitrification devrait être totale dans ce sol après 280 jours environ.

Il se dégage de cet essai que, dans les conditions de température normalement réalisée dans les sols en place et dans la très grande majorité des sols cultivés, l'hydrolyse et la nitrification totale du biuret demandera moins d'un an.

La concentration réalisée dans l'essai ci-dessus était très élevée, dépassant largement les seuils de toxicité physiologique et encore plus la concentration pratiquement réalisable à la suite de fumures à l'urée.

D'autre part, les températures observées dans le sol au début de l'essai ont été anormalement basse pour notre région, bien que pratiquement réalisables sous des climats habituellement plus rigoureux.

En application de printemps, la température permet une activité microbienne plus intense (conditions réalisées dans notre essai à partir de mai) et l'allure de la nitrification du biuret se rapproche de celle observée en Étuve. La nitrification totale ne devrait donc pas dans les conditions normales de la pratique agricole demander plus de 4 à 5 mois.

Cet ensemble de faits permet d'affirmer que la conservation du biuret dans le sol et par suite son accumulation avec le temps par apports successifs est tout à fait improbable.

B. — Hydrolyse et nitrification du biuret en présence d'urée

Dans la pratique, le biuret ne peut être présent dans le sol qu'associé à l'urée, avec laquelle il aura été apporté. Il est donc utile de savoir si l'existence d'une certaine proportion de biuret exerce ou non une influence sur l'hydrolyse et la nitrification de l'urée qui le contient, et d'autre part, comment le biuret lui-même, évolue quand il se trouve en présence d'urée.

Les essais suivants ont été réalisés dans ce but :

1° En Étuve à 28°C

L'essai a été réalisé dans 2 sols différents, ceux dans lesquels on a étudié en Étuve l'évolution du biuret seul :

— le sol de limon profond et fertile de pH 6,5 ;

— le sol argilo-calcaire de coteau, de faible fertilité, dosant 16,5 p. 100 de CO_3Ca.

En étudiant l'évolution du biuret seul, nous avons dû, pour conserver aux résultats une bonne précision, utiliser des concentrations dans le sol assez élevées et non réalisées dans la pratique.

Dans cet essai, en conservant une concentration en Azote normale, nous avons tenté de descendre à des taux de biuret plus bas. Cependant les teneurs en biuret des urées utilisées restent beaucoup plus élevées que celles rencontrées en fait.

Les techniques expérimentales étaient analogues à celles décrites pour le précédent essai en étuve.

Les traitements en comparaison étaient les suivants :

	Azote introduit en mg/kg de sol sec			Répartition pour 100 de l'azote introduit			Biuret mg par kg de sol sec
	Ammoniacal	Uréique	du biuret	Ammoniacal	Uréique	du biuret	
Sulfate de NH_4.....	200			100			
Urée pure.....		200	0		100	0	0
Urée à 5 % de biuret...		191	9		95,7	4,3	22
Urée à 10 % de biuret...		183	17		91,3	8,7	43
Urée à 15 % de biuret...		174	26		86,8	13,2	65
Urée à 25 % de biuret...		155	45		77,7	22,3	112

Les résultats sont indiqués au tableau X et figurés par les courbes des graphiques 6 et 7. Ces résultats sont dans chaque cas, exprimés de deux façons : en azote retrouvé, soit sous forme minérale, soit sous forme nitrique, pour cent de l'azote total introduit d'une part, et pour cent de l'azote uréique introduit d'autre part. Cette dernière façon permet de juger si l'hydrolyse et la nitrification de l'azote uréique s'est modifiée en présence de biuret.

Ils permettent les commentaires suivants :

Tableau X

Nombre de jours :	3	7	14	21	35	49	76
Sol de limon à pH 6,5							
Azote minéral ammoniacal + nitrique % de l'azote introduit.							
Sulfate de NH_4	84	87	86	84	86	86	89
Urée pure	74	84	84	84	89	87	88
Urée à 5 % biuret	71	82	83	83	86	84	87
Urée à 10 % biuret	64	72	82	82	84	86	87
Urée à 15 % biuret	60	67	80	80	82	85	86
Urée à 25 % biuret	55	63	72	74	80	82	86
Azote minéral ammoniacal + nitrique % de l'azote uréique introduit							
Urée pure	74	84	84	84	89	87	88
Urée à 5 % biuret	74	86	87	87	90	88	91
Urée à 10 % biuret	70	79	90	90	92	94	95
Urée à 15 % biuret	69	77	92	92	94	98	99
Urée à 25 % biuret	71	81	93	95	103	106	111
Azote nitrifié % de l'azote introduit							
Sulfate de NH_4		10	17	26	50	69	80
Urée pure		34	56	70	85	87	88
Urée à 5 % biuret		31	54	67	80	84	87
Urée à 10 % biuret		29	52	65	78	83	87
Urée à 15 % biuret		27	51	61	77	82	86
Urée à 25 % biuret		26	47	58	74	79	86
Azote nitrifié % de l'azote uréique introduit							
Urée pure		34	56	70	85	87	88
Urée à 5 % biuret		32	56	70	84	88	91
Urée à 10 % biuret		32	57	71	85	91	95
Urée à 15 % biuret		31	59	70	89	94	99
Urée à 25 % biuret		33	61	75	95	102	111
Sol argilo-calcaire.							
Azote minéral ammoniacal + nitrique % de l'azote introduit							
Sulfate de NH_4	84	84	85	88	90	90	90
Urée pure	79	80	88	92	88	90	90
Urée à 5 % biuret	76	78	86	90	86	89	90
Urée à 10 % biuret	72	74	83	86	86	88	90
Urée à 15 % biuret	68	70	80	83	82	88	90
Urée à 25 % biuret	64	66	70	76	79	84	89
Azote minéral ammoniacal + nitrique % de l'azote uréique introduit							
Urée pure	79	81	88	92	88	90	90
Urée à 5 % biuret	79	82	90	94	90	93	94
Urée à 10 % biuret	79	81	91	94	94	96	99
Urée à 15 % biuret	78	81	92	96	95	101	104
Urée à 25 % biuret	82	85	90	98	102	108	115
Azote nitrifié % de l'azote introduit							
Sulfate de NH_4		4	57	88			
Urée pure		6	67	92			
Urée à 5 % biuret		8	65	90	*Idem*		
Urée à 10 % biuret		7	62	86	que N minéral		
Urée à 15 % biuret		6	54	83			
Urée à 25 % biuret		5	39	76			
Azote nitrifié % de l'azote uréique introduit							
Urée pure		6	67	92			
Urée à 5 % biuret		8	68	94	*Idem*		
Urée à 10 % biuret		8	68	94	que N minéral		
Urée à 15 % biuret		7	62	96			
Urée à 25 % biuret		6	50	98			

INFLUENCE DU BIURET SUR LA TRANSFORMATION DE L'URÉE

En ce qui concerne l'hydrolyse de l'Azote uréique, la présence de biuret a provoqué dans le sol de limon, un léger retard, à partir d'une concentration de 43 mg par kg de terre. Ce retard atteint au maximum

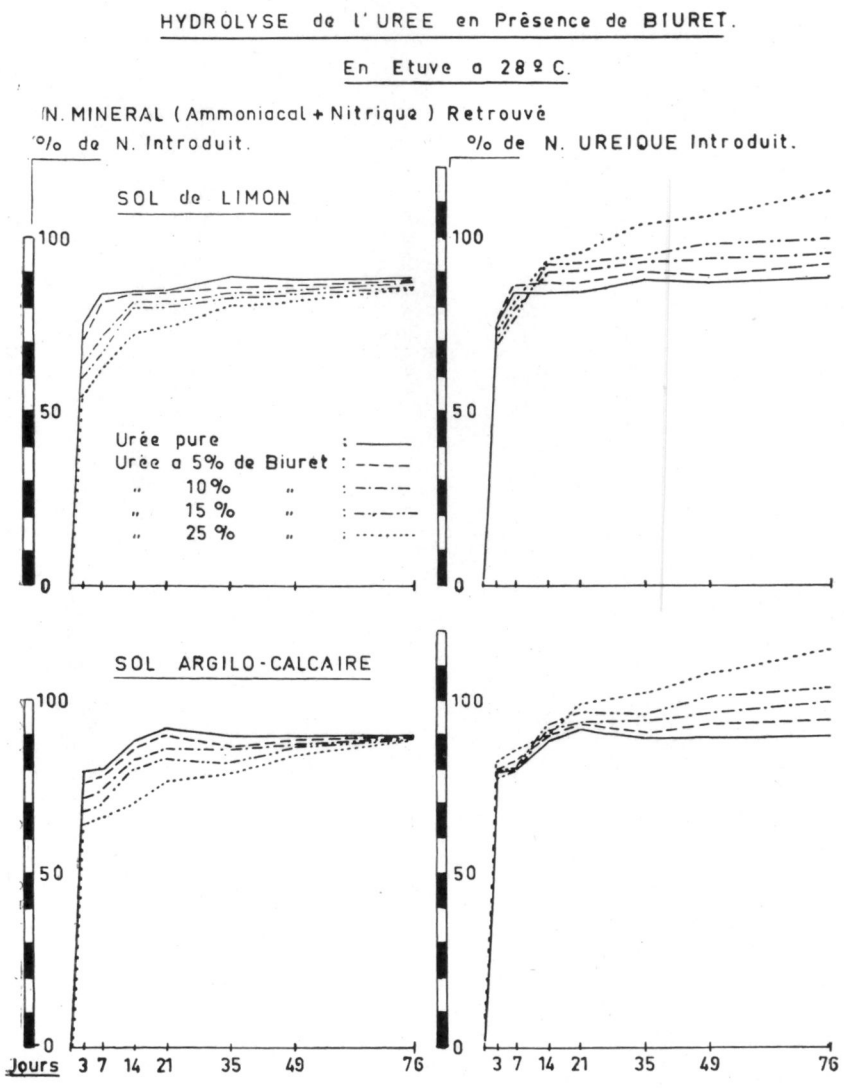


FIG. 6.

7 p. 100 de l'azote uréique introduit. Il est décelable à 3 et 7 jours, mais il est comblé à 14 jours. En sol argilo-calcaire, la présence de biuret ne semble exercer aucune influence.

Par contre, à partir de 14 jours dans le sol de limon et dès le début dans le sol calcaire, le bilan de l'azote minéral exprimé en p. 100 de l'azote uréique introduit est plus élevé, en présence de biuret que pour l'urée pure.

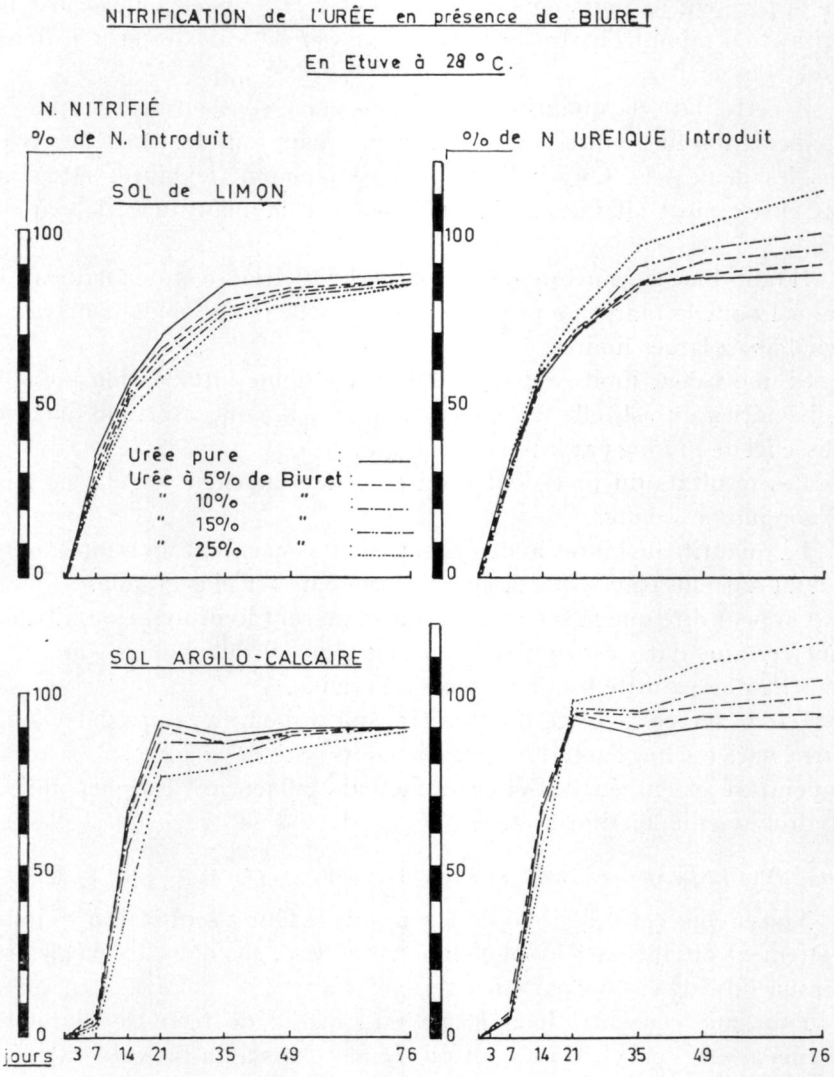


FIG. 7.

Il est par la suite d'autant plus élevé que le taux de biuret est plus fort, ce qui traduit l'hydrolyse du biuret lui-même.

En ce qui concerne la nitrification de l'azote uréique introduit, la présence de biuret ne l'influe pas au début dans le sol de limon. Dans le sol calcaire, on constate à 14 jours un retard de 5 et 17 p. 100 respecti-

vement pour les concentrations de 65 et 112 mg par kg de terre. Ce retard est comblé à 21 jours.

Comme pour l'hydrolyse, l'estimation de l'azote nitrifié en p. 100 de l'azote uréique apporté, traduit la nitrification du biuret lui-même. Elle apparaît à 14 jours en sol de limon et à 21 jours en sol calcaire. La nitrification rejoint l'hydrolyse dès 21 jours en sol calcaire et à 76 jours en sol de limon.

A cette date, la quantité d'azote récupérée sous forme nitrique est en valeur absolue, pratiquement la même pour tous les traitements et dans les deux sols. Ceci indique qu'à ce moment, le biuret introduit a été entièrement nitrifié et cela quelle que soit la quantité initiale appliquée.

Il faut donc en conclure que le pouvoir d'hydrolyse et de nitrification d'un sol pour le biuret ne présente pas une valeur fixe mais peut varier dans d'assez larges limites.

Si une valeur limite existe, conséquence d'une intoxication possible des bactéries du sol, elle n'est pas atteinte à la concentration maxima utilisée ici de 112 mg par kg de terre.

Les résultats du précédent essai en étuve montrent qu'elle ne l'est pas non plus à 250 mg.

La quantité de biuret hydrolysé ou nitrifiée pendant un temps donné est d'autant plus élevée que la quantité présente est plus grande.

On peut dire que la fraction du biuret présent hydrolysée ou nitrifiée à une certaine date, est proportionnée au temps écoulé depuis son application et à la quantité totale présente à l'origine.

L'importance de cette fraction transformée en un temps déterminé, pourra varier selon l'activité microbienne propre de chaque sol, selon la température et en général selon les facteurs influençant les phénomènes d'hydrolyse et de nitrification.

Influence de l'urée sur la transformation du biuret

Nous avons constaté précédemment que le biuret seul était à 76 jours entièrement nitrifié dans le sol de limon et à 80 p. 100 dans le sol calcaire, pour une dose de 125 mg par kg de terre.

Pour une concentration voisine, 112 mg/kg de terre, le biuret en présence d'urée, parvient au bout du même temps à un taux de nitrification tout à fait comparable.

Si dans le mélange urée-biuret on calcule les taux d'hydrolyse et de nitrification du biuret lui-même, en fonction du temps, et qu'on les compare à ceux du biuret seul trouvés précédemment, on obtient les résultats traduits par les courbes du graphique 8.

Il apparaît que le biuret à concentration égale, hydrolyse et nitrifie sensiblement plus tôt et plus rapidement en présence d'urée que seul.

D'autre part, si dans le sol calcaire, l'hydrolyse du biuret avec urée ne précède la nitrification que pendant 21 jours, dans le sol de limon, elle la précède jusqu'à 76 jours.

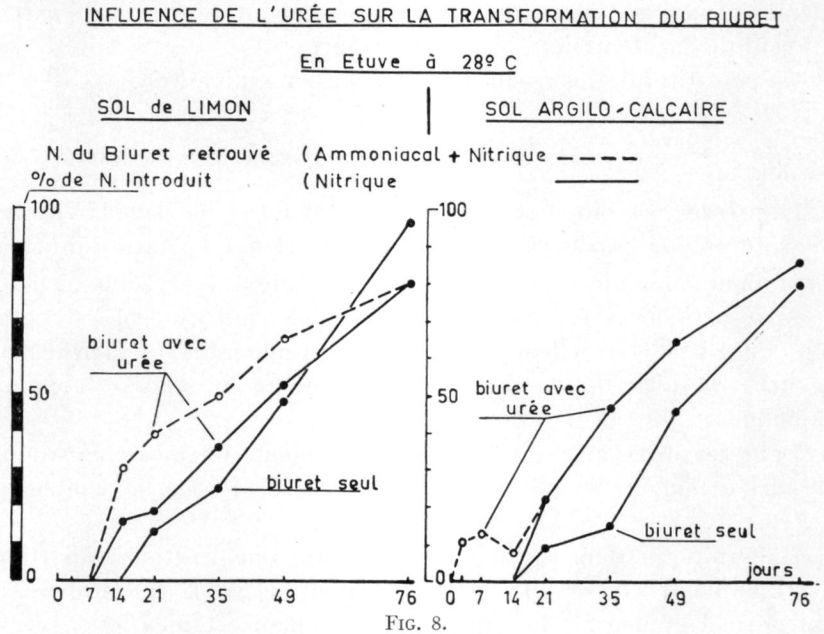


FIG. 8.

Nous n'avions pas constaté avec le biuret seul, de décalage entre l'hydrolyse et la nitrification.

Ceci semblerait indiquer que la présence d'urée active principalement le phénomène d'ammonisation du biuret. Mais de toute manière la présence d'urée contribuera à faire disparaître plus vite le biuret sous sa forme toxique.

2° A la température extérieure

Cet essai a été réalisé en même temps et selon la même technique expérimentale que celui relaté pour l'étude de la nitrification du biuret seul.

Les trois mêmes sols ont été utilisés :

— sol de boulbène peu fertile à pH 5,

— sol de limon fertile à pH 6,5,

— sol argilo-calcaire de fertilité moyenne à pH 7,5.

Les traitements en comparaison étaient les suivants :

	Azote introduit en mg/kg de sol sec		Répartition pour 100 de l'azote introduit		Biuret mg p/kg de sol sec
	uréique	du biuret	uréique	du biuret	
Urée à 3 % de biuret.....	97,4	2,6	97,4	2,6	6,5
Urée à 20 % de biuret.....	82,3	17,7	82,3	17,7	44
Urée à 50 % de biuret.....	54	46	54	46	115

Les résultats sont indiqués au tableau XI et figurés aux graphiques 9 et 10.

Comme pour le précédent essai, ils sont exprimés en azote retrouvé, minéral ou nitrique, pour cent de l'azote total introduit, d'une part et pour cent de l'azote uréique seul d'autre part.

On peut tirer de ces résultats les conclusions suivantes :

Influence du biuret sur la transformation de l'urée

La présence du biuret provoque un retard décelable dans l'hydrolyse de l'azote uréique uniquement dans le sol à pH 5. Ce retard qui atteint au maximum 6 p. 100 de l'azote uréique présent est visible pendant 78 jours, période pendant laquelle la température du sol est restée basse. Ce sol est naturellement peu fertile ; il minéralise et nitrifie mal ; la courbe de nitrification du sulfate d'ammoniaque en est la preuve (graphique 5).

Dans les deux autres sols de fertilité bonne ou moyenne, soumis à la même température, l'hydrolyse de l'azote uréique ne semble pas affectée.

Il faut noter dans le sol argilo-calcaire, une fixation importante d'azote ammoniacal, sous forme non extractible par le chlorure de calcium normal et neutre. Le déficit dans le bilan est identique avec le sulfate de NH_4 et avec l'urée. Il subsiste jusqu'à ce que la nitrification devienne active.

A partir de 78 jours dans le premier sol, et dès le 10e jour, dans les deux autres, l'hydrolyse du biuret lui-même apparaît. Ceci est surtout net quand la température du sol se relève, mais est déjà marqué à basse température pour le sol le plus fertile.

En ce qui concerne la nitrification de l'azote uréique introduit, la présence de biuret provoque également un retard dans le sol le moins fertile. Il subsiste pendant 78 jours et atteint 10 p. 100 de l'azote uréique apporté pour l'urée à 50 p. 100 de biuret. Aucun retard n'est visible dans les deux autres sols. La nitrification du biuret lui-même apparaît sensiblement aux mêmes dates que son hydrolyse, mais comme celle-ci, elle est surtout nettement perceptible quand la température se relève dans le sol.

A 176 jours, la nitrification a rejoint l'hydrolyse dans les trois sols. A cette date, le bilan de l'azote retrouvé sous forme nitrique est en valeur absolue exactement le même pour les trois traitements dans le sol le plus fertile.

Dans les deux autres cas, il subsiste un léger retard pour l'urée à 50 p. 100 de biuret. Il est de 14 p. 100 de l'azote introduit pour le sol à pH 5 et de 8 p. 100 pour celui à pH 7,5.

Tableau XI

Nombre de jours :	5	10	17	24	36	51	78	106	136	176
Sol à pH 5,0										
N minéralisé										
% de N introduit										
Urée 3 % biuret	74	90	91	93	94	94	94	94	95	96
Urée 20 % biuret	57	76	76	76	76	76	80	85	90	96
Urée 50 % biuret	40	49	50	48	50	49	50	61	72	82
% de N uréique introduit										
Urée 3 % biuret	76	93	94	96	97	97	97	97	98	99
Urée 20 % biuret	69	92	92	92	92	92	97	103	109	117
Urée 50 % biuret	74	91	93	90	93	91	93	113	133	152
N nitrifié										
% de N introduit										
Urée 3 % biuret	3	6	9	15	25	35	46	65	85	96
Urée 20 % biuret	1	2	6	10	18	24	36	64	84	96
Urée 50 % biuret	0	1	4	8	13	15	20	42	66	82
% de N uréique introduit										
Urée 3 % biuret	3	6	9	15	26	36	47	67	87	99
Urée 20 % biuret	1	2	7	12	22	29	44	78	102	117
Urée 50 % biuret	0	2	7	15	24	28	37	78	122	152
Sol à pH 6,5										
N minéralisé										
% de N introduit										
Urée 3 % biuret	85	85	85	85	86	88	90	92	94	95
Urée 20 % biuret	67	71	73	74	75	78	85	89	92	96
Urée 50 % buiret	47	49	50	50	52	59	64	70	82	95
% de N uréique introduit										
Urée 3 % biuret	87	87	87	87	88	90	92	94	97	98
Urée 20 % biuret	81	86	89	90	91	95	103	108	112	117
Urée 50 % biuret	87	91	93	93	96	109	119	130	152	176
N nitrifié										
% de N introduit										
Urée 3 % biuret	8	16	32	50	72	83	90	92	*Idem*	
Urée 20 % biuret	6	12	26	43	63	70	81	88	N minéra-	
Urée 50 % biuret	4	10	21	32	50	55	62	70	lisé	
% de N uréique introduit										
Urée 3 % biuret	8	16	33	51	74	85	92	94	»	»
Urée 20 % biuret	7	15	32	52	77	85	98	107		
Urée 50 % biuret	7	19	39	59	93	102	115	130	»	»
Sol à pH 7,5										
N minéralisé										
% de N introduit										
Urée 3 % biuret	65	66	66	66	66	66	75	85	88	90
Urée 20 % biuret	55	56	57	58	59	59	67	82	88	91
Urée 50 % biuret	36	37	38	39	40	41	49	64	71	82
% de N uréique introduit										
Urée 3 % biuret	67	68	68	68	68	68	77	87	90	92
Urée 20 % biuret	67	68	69	70	72	72	81	100	107	111
Urée 50 % biuret	67	69	70	72	74	76	91	119	131	152
N nitrifié										
% de N introduit										
Urée 3 % biuret	2	3	6	10	15	17	40	40	*Idem*	
Urée 20 % biuret	1	2	4	9	14	16	37	N minéralisé		
Urée 50 % biuret	1	2	3	8	11	15	30	60	67	»
% de N uréique introduit										
Urée 3 % biuret	2	3	6	10	15	17	41	*Idem*		
Urée 20 % biuret	1	2	5	11	17	19	45	N minéralisé		
Urée 50 % biuret	2	4	6	15	20	28	56	111	124	»

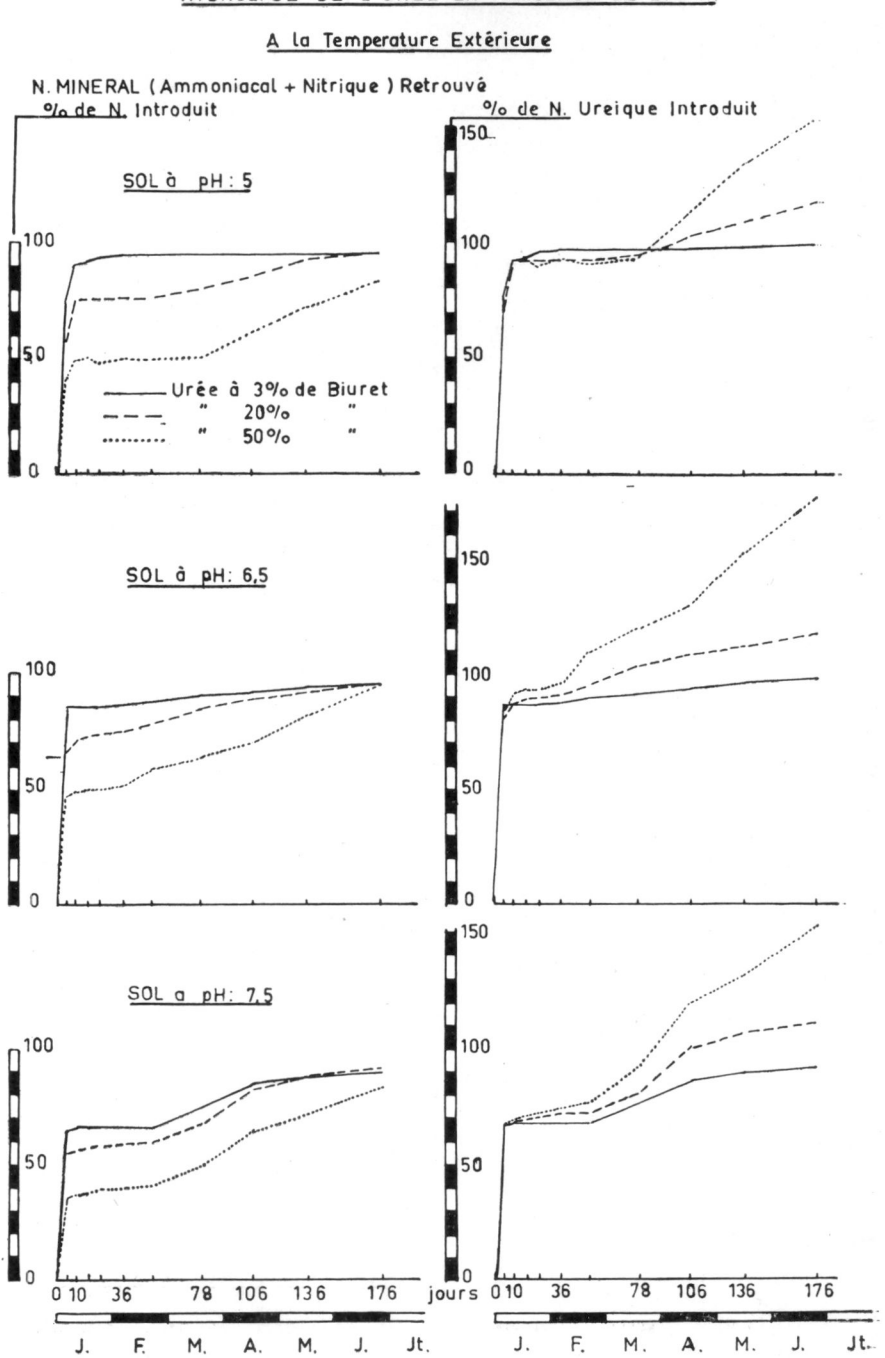

HYDROLYSE DE L'UREE EN PRESENCE DE BIURET
A la Temperature Extérieure
N. MINERAL (Ammoniacal + Nitrique) Retrouvé
% de N. Introduit
% de N. Ureique Introduit
SOL à pH: 5
SOL à pH: 6,5
SOL a pH: 7,5
Urée à 3% de Biuret
" 20% "
" 50% "
100
50
0
150
0 10 36 78 106 136 176
jours
J. F. M. A. M. J. Jt.

FIG. 9.

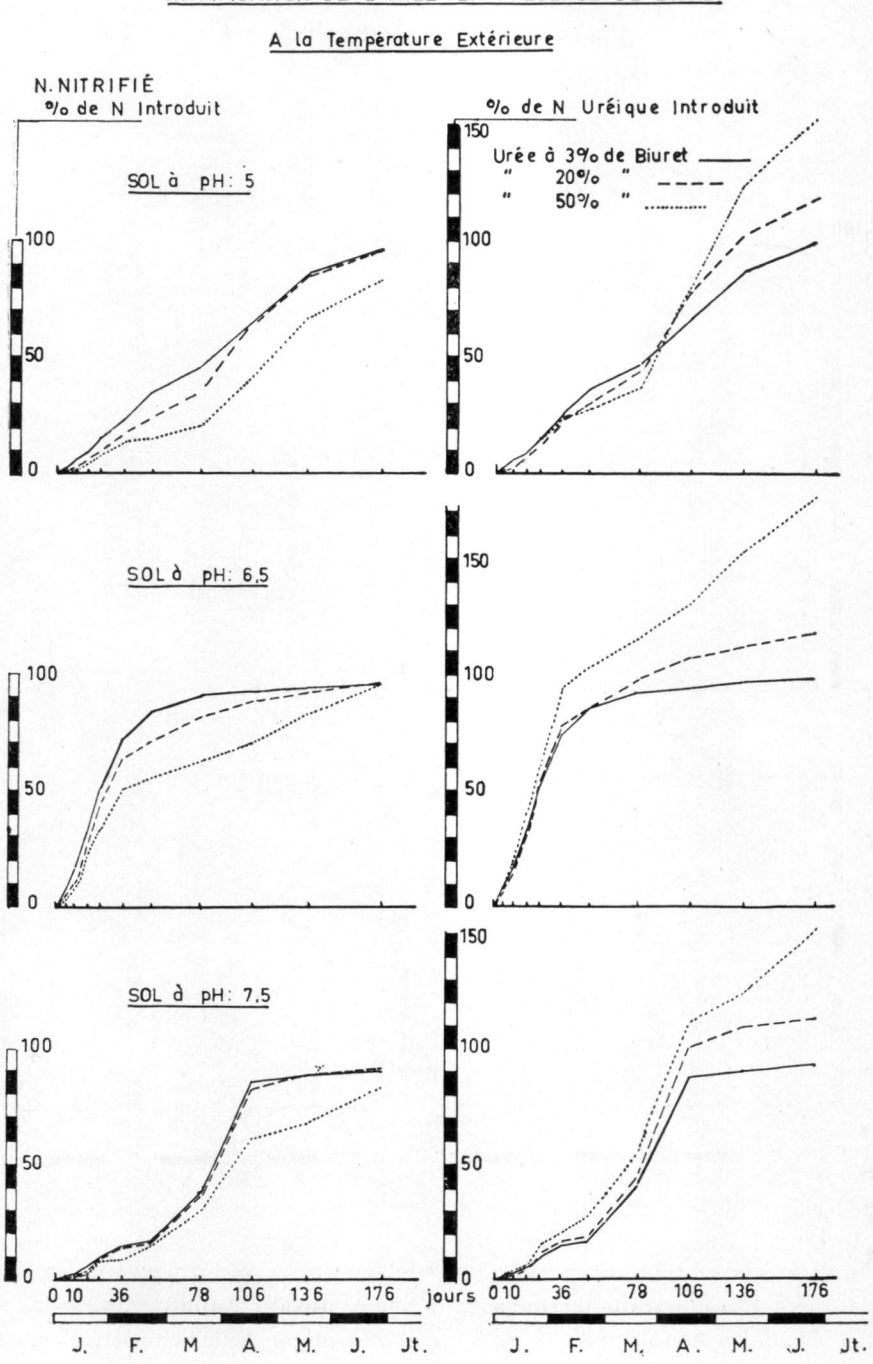

NITRIFICATION DE L UREE EN PRESENCE DE BIURET
A la Température Extérieure
N. NITRIFIÉ
% de N Introduit
% de N Uréique Introduit
Urée à 3% de Biuret
" 20% "
" 50% "
SOL à pH: 5
SOL à pH: 6,5
SOL à pH: 7,5
0
50
100
150
0 10 36 78 106 136 176
jours
J. F. M A. M. J. Jt.

FIG. 10.

INFLUENCE DE L'URÉE SUR LA TRANSFORMATION DU BIURET

Si dans les mélanges, urée-biuret, on calcule les taux d'hydrolyse et de nitrification du biuret lui-même en fonction du temps et qu'on les compare à ceux du biuret seul trouvés dans les mêmes conditions, on obtient les résultats traduits par les courbes du graphique 11 :

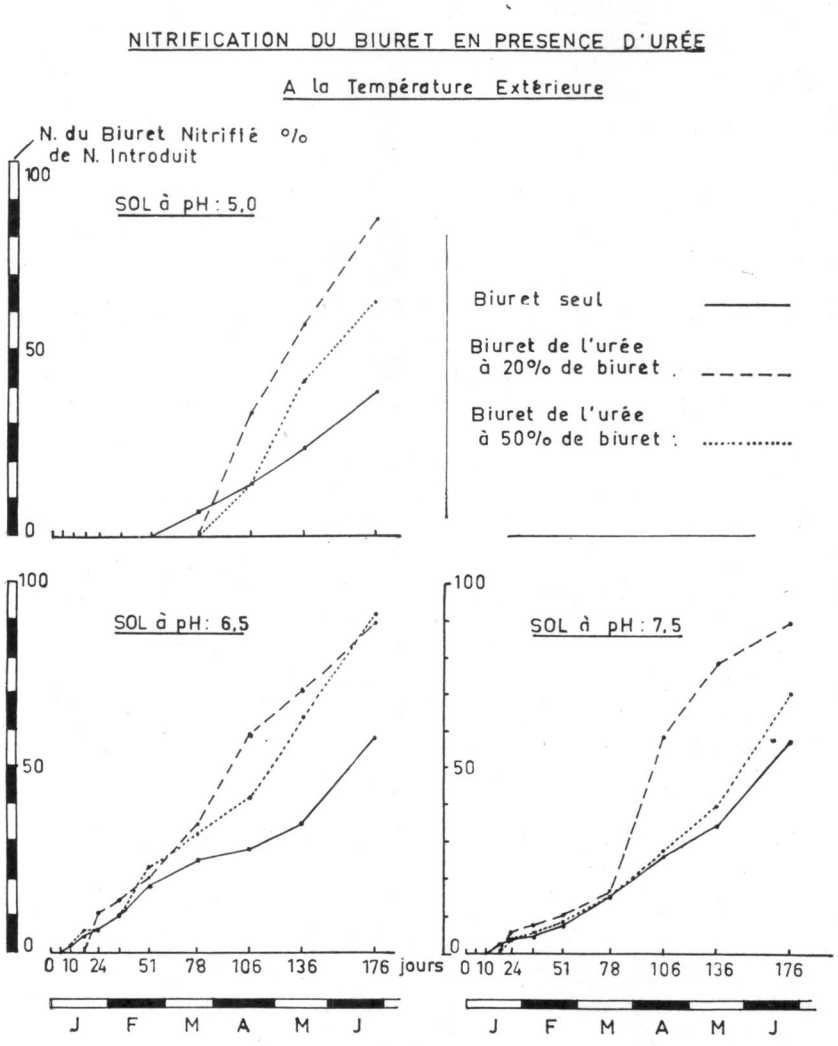


FIG. 11.

Dans le sol de limon fertile, le biuret en présence d'urée a totalement nitrifié à 176 jours, quelle que soit la concentration appliquée.

Dans les deux autres sols, il en est de même à la concentration de 44 p. p. m. ; mais à 115 p. p. m., le biuret n'a nitrifié qu'à 70 p. 100 environ.

On constate ici, comme nous l'avons fait en étuve, que la quantité de biuret transformée pendant un temps donné, est d'autant plus élevée que la quantité présente est plus grande.

Pour le sol le plus actif, la quantité nitrifiée à 176 jours est proportionnelle à la dose appliquée. Pour les autres sols, cette proportionnalité ne serait réalisée qu'au bout d'un temps plus long.

Dans ces trois sols, la nitrification du biuret seul à la concentration de 250 p. p. m. est sensiblement en retard. Elle sera complète à 216 jours pour les 2 sols les plus fertiles et réalisée à 63 p. 100 dans le premier.

Ceci pourrait s'expliquer par une intoxication des bactéries du sol fonction de la dose appliquée. Or, nous avons vu dans les essais en Étuve, que l'allure de la nitrification variait peu avec la concentration en biuret. Il est cependant possible que dans le cas de sols à faible activité microbienne, ou en présence de conditions de température sévères comme celles réalisées ici, les phénomènes d'hydrolyse et de nitrification soient plus sensibles aux variations de dose.

Ceci peut s'expliquer aussi par une transformation du biuret plus active en présence d'urée. Dans les sols à pH 5 et 7,5, le taux du biuret transformé est d'autant plus élevé qu'il y a davantage d'azote uréique présent. Cette hypothèse serait tout à fait en accord avec ce que nous avons constaté précédemment en étuve.

La présence de biuret n'est donc susceptible de ralentir l'hydrolyse et la nitrification de l'azote uréique qui l'accompagne que dans les sols de faible activité microbienne. Cet handicap n'affectera que le début de l'évolution de l'azote uréique et sur une courte durée. Même dans des conditions de température très sévères, son importance restera faible.

Dans les sols de fertilité normale, la présence de biuret ne modifie en rien l'évolution de l'urée. Par contre, le biuret lui-même va se transformer et nitrifier plus vite. Cette transformation dépendra évidemment de l'activité propre de chaque sol et des conditions de température, mais elle est favorisée par la présence simultanée d'azote uréique.

La quantité de biuret transformée par un sol pendant un temps donné, sera d'autant plus grande que la quantité appliquée sera plus élevée. Celle-ci peut être importante, hors de proportion avec celle pouvant être rencontrée en pratique, sans que la vitesse de transformation du biuret soit beaucoup affectée.

On peut admettre que la quantité de biuret transformée à une certaine date, sera proportionnée au temps écoulé depuis son application et à la quantité appliquée.

Pour les sols minéralisant normalement ou quand les conditions influençant l'activité microbienne sont bonnes, cette règle reste vraie jusqu'à de très fortes concentrations.

Dans des conditions défavorables, la proportionnalité peut n'être réalisée qu'au bout d'un temps légèrement plus long.

Un apport important ou une forte localisation dans le sol, ne risque donc pas d'étirer considérablement la durée de transformation totale du biuret.

CONCLUSIONS

La toxicité du biuret pour la végétation n'aurait pas grande importance agronomique si ce produit ne se trouvait obligatoirement mêlé à un engrais azoté que l'industrie est à même de fabriquer maintenant en grandes quantités.

Il était donc indispensable d'éclairer cette industrie sur les dangers que pourrait présenter la persistance de cette impureté en quantités trop élevées, en vue de l'inciter à perfectionner ses fabrications jusqu'à la pureté désirable.

Du côté agronomique, il fallait préciser la nature et la gravité du danger en fixant les seuils de toxicité à ne pas dépasser pour les plantes appelées à bénéficier de fertilisations à l'urée, soit par application au sol, soit par voie foliaire. Cette connaissance doit permettre d'éviter les accidents et d'estimer la marge de sécurité que laissera l'usage courant à dose normale d'urées industrielles.

L'étude sur l'évolution du biuret se proposait de lever le doute sur l'accumulation de biuret dans le sol jusqu'à une concentration qui pourrait devenir toxique à partir d'applications répétées d'urée impure. Parallèlement on a pu étudier l'influence réciproque de l'urée et du biuret sur l'hydrolyse et la nitrification de l'un ou l'autre de ces composés azotés appliqués simultanément.

La toxicité du biuret sur la germination du blé apparaît dès que la concentration atteint 40 p. p. m. en milieu aqueux. Dans un sol le seuil de toxicité est reculé jusqu'à 9 p. p. m. de sol (6 kg/ha de biuret). Il s'agit des premières manifestations décelables : les dégâts sérieux ne se produisent qu'avec des concentrations deux fois plus fortes. L'application de 60 kg d'azote au semis sous forme d'urée industrielle à 1 ou 2 p. 100 de biuret en amenant 1,3 à 2,6 kg à l'hectare, il ne semble pas y avoir de danger sérieux de ce côté.

Sur la végétation du blé, le seuil de toxicité est encore reculé et paraît se situer autour de 15 kg environ de biuret à l'hectare. La toxicité va s'atténuant avec le temps.

Le maïs paraît plus résistant que le blé : les premiers dégâts apparaissent au-dessus de 15 kg de biuret à l'hectare pour une application au semis et au-dessus de 30 kg à l'hectare pour une application sur jeunes plantes à 6 feuilles ayant 40 cm de haut.

La pomme de terre manifeste de manière spectaculaire son atteinte par le biuret. Heureusement la gravité des dégâts n'est pas en rapport avec l'intensité du signal. D'autre part, cette plante parvient à assimiler le biuret et surmonte son intoxication. Les symptômes sont décelables à partir de 3 à 4 kg de biuret à l'hectare en application localisée autour des semences.

En pulvérisations foliaires seuls parmi les plantes que nous avons observées, les orangers sont très sensibles et demandent une urée contenant moins de 0,5 p. 100 de biuret.

Le biuret appliqué au sol n'est pas retenu par les colloïdes et peut être librement entraîné par les eaux d'infiltration. Il s'hydrolyse pour former de l'ammoniac tout comme l'urée, mais beaucoup plus lentement que celle-ci. Quand l'urée ne demande que 2 à 4 jours pour s'hydrolyser il faut compter sur 3 à 6 mois pour une transformation totale du biuret. Des doses beaucoup plus élevées que celles réalisables pratiquement peuvent ainsi être rendues inoffensives et même bénéfiques, puisque l'ammoniac en provenance du biuret sera assimilable par les plantes avant ou après nitrification.

La présence d'urée paraît accélérer l'hydrolyse du biuret, tandis que l'influence inverse du biuret sur l'urée ne paraît pas sérieusement à craindre.

En somme le biuret est certainement un composé toxique qui posait aux industriels un sérieux problème technique et pouvait susciter parmi les agronomes des inquiétudes justifiées. L'étude agronomique et physiologique de sa toxicité a permis de préciser le danger. Les progrès technologiques dans la fabrication de l'urée l'ont rendu par ailleurs beaucoup moins réel. Un accident n'est pratiquement plus possible. Mieux vaut cependant connaître la nature du danger réel et veiller.

Cette vigilance s'impose particulièrement aux fabricants d'urée qui devront surveiller assidûment la teneur en biuret de toutes leurs fabrications à usage agricole.

RÉSUMÉ

Les auteurs étudient les effets toxiques du biuret sur la germination et la végétation du blé, du maïs et de la pomme de terre, plantes pour lesquelles ils ont déterminé des concentrations minima nuisibles. Ils rendent compte d'observations réalisées sur arbres fruitiers divers.

Dans une seconde partie, les auteurs étudient le destin du biuret appliqué au sol à l'occasion de l'épandage d'urée impure ainsi que l'influence possible du biuret sur l'hydrolyse et la nitrification de l'urée. La conclusion de cette étude est que le biuret ne peut s'accumuler dans le sol jusqu'à une dose toxique car il est entraînable par les eaux de drainage et d'autre part rapidement hydrolysé et nitrifié. Les accidents éventuels ne pourraient donc provenir que de

l'application d'urées très impures l'année même de cette application. Les seuils de toxicité étant très au-dessus des concentrations pratiquement réalisables à partir des fabrications actuelles d'urée même pour des applications à des taux très élevés, il semble que le danger d'accident par application au sol soit une éventualité dépassée aujourd'hui.

SUMMARY

Investigations on the toxic effects and evolution in soil of biuret.

The toxic effects of biuret on the germination and growth of wheat, maize and potato are studied, and minimum toxic-concentrations for these crops are determined. Observations made on different fruit trees are also included.

A study is also made of the evolution of biuret applied to the soil in urea which contains impurities, and of the possible effect of biuret on the hydrolysis and nitrification of urea.

It is concluded that biuret cannot accumulate in toxic amounts in soil, since it undergoes rapid leaching, hydrolysis and nitrification. Possible damage can only result in the year of application of heavily contaminated urea. Since toxic concentrations are much below those obtained in the present-day manufacture of urea, the danger of any damage even at very high rates of application is rather slight.

ZUSAMMENFASSUNG

Untersuchungen über die toxische Wirkung des Biuret und die Evolution dieses Stoffes in den Böden

Die Autoren untersuchen die toxische Wirkung des Biurets auf die Keimung und das Wachstum des Weizens, des Mais und der Kartoffel, Pflanzen für welche sie die schädigende Minimalkonzentration bestimmten. Sie geben ferner Aufschluss über erzielte Beobachtungen bei verschiedenen Obstbäumen.

Im zweiten Teil ihrer Arbeit, untersuchen die Autoren das Schicksal des dem Boden, gelegentlich eines Ausstreuens unreinen Harnstoffes beigebrachtem Biurets, ferner den möglichen Einfluss des letzteren auf die Hydrolyse und Nitrifizierung des Harnstoffes.

Die Schlussfolgerungen, welche diese Arbeit zulässt, zeigen dass sich im Boden das Biuret nicht bis zu einer toxischen Dosis anhäufen kann, da es durch das Drainagewasser fortgespült wird und andererseits, einer schnellen Hydrolyse und Nitrifizierung unterliegt. Etwaige Schädigungen können daher nur von einer in demselben Jahre verabreichten Gabe unreinen Harnstoffes herrühren.

Da die Toxizitätsschwelle viel höher liegt als die, in der gegenwärtigen Harnstofffabrikation praktisch realisierbaren Konzentrationen, so gilt heuzutage, bei Bodendüngung, auch für sehr hohe Verabreichungen, jede Schädigungsgefahr als überholt.

Изыскания относительно вредного влияния биурета и относительно эволюции этого вещества в почве.

Р. ГАДЕТ, Л. СУБІЕС и Ф. ФУРКАССИЕ. (О. Н. І. А., Тулуза).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Авторы изучают вредное влияние биурета (biuret) на прорастание и рост пшеницы, маиса и картофеля; они определили для этих растений те наименьшие концентрации, при которых замечается вредное влияние. Они описывают сделанные на различных фруктовых деревьях наблюдения.

Во второй части, авторы изучают судьбу биурета внесенного в почву по случаю применения неочищенной мочевины (= удобрения « urée »), равно как и возможное влияние биурета на гидролиз и нитрификацию мочевины. Заключение этого изыскания таково : биурет не может накопиться в почве до вредной дозы, так как он уходит с дренажными водами и, с другой стороны, он быстро гидролизируется и подвергается нитрификации. Возможные злоключения могли бы быть вызваны применением мочевины очень плохо очищенной в год этого применения. Так как пороги вредности находятся значительно выше концентраций реализованных в практике, пользуясь приготовляемой в настоящий период мочевиной даже для применения в количествах очень значительных, то кажется, что опасность злоключения в случае внесения ее в почву является в настоящее время невозможной.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) Winston Jones (W.) et Steinocker (M. L.). — « Les Pulvérisations d'urée comme source d'Azote pour les citrus » *Citrus Leaves,* janv., 1953, p. 10.

(2) Winston Jones (W.). — « Toxicité due au biuret de l'urée en application foliaire sur le citronnier » *Science,* 24 sept., 1954, p. 499.
Jones (W. W.), Embleton (T. W.), Goodall (G. E.). — Urée, Source d'Azote pour les Agrumes *Citrus Leaves,* nov. 1955, vol. 35, p. 12.

(3) Oberbacher (M. F.). — « Une chlorose des agrumes produite par le biuret, impureté de l'urée ». *Florida State Horticultural Society,* vol. LXVII, oct. 1954, p. 67.

(4) Sanford (W. G.), Growing (D. P.), Young (H. Y.), Leeper (R. W.).— « Toxicité pour les ananas du biuret contenu dans des urées de différentes provenances ». *Science,* 27 août 1954, p. 349.

(5) David Walker (R.) et Elwood Fischer (G.). — « Pulvérisations foliaires d'urée sur cerisiers à fruits acides ». *Proceedings of the American Society of Horticultural Science.* Vol. 66 — déc. 1955, p. 21.

(6) Vaidyanathan Cokkanna et Norayanan. — « Symptômes foliaires de la toxicité du biuret sur le caféier ». *The Indian Journal of Horticulture,* sept. 1956.

(7) Haas (A. R. C.) et Brusca (Joseph N.). — « Biuret, forme toxique de l'azote ». *California, agriculture,* juin 1954, p. 7.

(8) Rai (G. S.), Hamner (C. L.) et Cook (R. L.). — « Effet du biuret sur des haricots poussant dans différents types de sols ». *Mich. Agric. Exp. Sta. Quart Bull.,* 39, p. 88-96.

(9) Drosdorff (M.), Barrows (H. L.), Shear (C. G.) et autres. — « Effets toxiques de l'urée sur les tungs adultes ». *Proc. Amér. Soc. Hort. Sci.,* **68,** p. 201-203.

(10) FUNABIKI (S.), OGATA (T.) et SAKOMOTO (T.). — « Études sur le biuret du point de vue agricole ». *Scientifics Reports of the Matsuyama Agricultural College*, 1954, Rapport I, nº 12.

(11) OGATA (T.) et FUNABIKI (S.). — « Études sur le biuret du point de vue agricole ». *Scientifics Reports of the Matsuyama Agricultural Collège*, 1954, Rapport II.

(12) HOFFMANN (O.). — Phytotoxicity of biuret. *Mimeographed Report of Spencer Chemical* Co Kansas City, Mo 1956.

(13) SMIKA (D. E.) et SMITH (F. W.). — « Influence néfaste du biuret, impureté de l'urée, sur la germination du blé ». *Soil Science*, oct. 1957, p. 273.

(14) WIDDOWSON (F. V.), PENNY (A.), WILLIAMS (R. J. B.), et autres. — « Formes d'Engrais Azotés — Pommes de terre ». *Rep. Rothamst. Exp. Sta.*, 1957, 47-48.

(15) STAROTSKA (R. W.) et CLARK (K. G.). — « Évaluation en serre et caractéristique de nitrification du biuret et des mélanges urée-biuret ». *Agricultural Chemicals*, oct. 1955.

(16) WIEHE (P. O.). — Résumé du rapport annuel de l'Institut de Recherches Sucrières 1957. *Extrait de la Revue Agricole et Sucrière de l'Ile Maurice*, vol. 37, nº 2, p. 80.

(17) ROTINI (O. T.). — « Urée, biuret et acide cyanique dans la fertilisation azotée des cultures ». *Annales de la Faculté d'Agronomie de Pise*, 1956, pp.1-25.

(18) ROTINI (O. T.). — « Quelques aspects de la fumure azotée des agrumes ». *Atti del convengo Nazionale Agrumario*, Palerme, 8 avril 1956.

(19) WEBSTER, BERNER et GANSA. — « L'effet du biuret sur la synthèse des protéines dans les plantes ». *Plant physiology*, janv. 57, p. 60/61.

(20) SOUBIES, GADET, LENAIN. — « Une difficulté particulière à la fertilisation azotée du maïs et le moyen d'y remédier. Compte rendu Académie d'Agriculture du 7 mars 1956, p. 246.

(21) LENAIN (M.). — Résultats des recherches sur la fumure du blé et du maïs. *Bulletin Agriculture du Sud-Ouest*, nº 382 et 383, 1958.

(22) SOUBIES (L.), GADET (R.) et LENAIN (M.). — Recherches sur l'évolution de l'urée dans les sols et sur son utilisation comme engrais azoté. *An. Agr.* VI-1955, p. 1 002.

(23) CARLES (J.). — Contribution à l'étude du mécanisme de l'intoxication des végétaux par le biuret. *An. Agr.*, série A, *Physiologie végétale* (sous presse).

631. 473 (44)

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES TERROIRS DE LA VALLÉE DE BASSE-SEINE

LES SOLS DU MÉANDRE DE DUCLAIR

E. JOUIS, M. Th LECACHEUX, F. CAUCHY
Station Agronomique, Rouen.

PLAN DU MÉMOIRE

I. — Introduction.
La Vallée de Basse-Seine. — But de l'étude.

II. — La Basse-Seine, de la préhistoire aux récents travaux d'endiguement.
Variations de niveau depuis la dernière glaciation.
Dépôt des alluvions anciennes sablo-caillouteuses pendant l'enfoncement du fleuve dans ses méandres.
Dépôt des alluvions récentes argilo-calcaires et établissement des tourbières de Basse-Seine.
Extension des dépôts, après les endiguements modernes.

III. — Les anciennes cultures de la vallée de Basse-Seine.
Alluvions sablo-caillouteuses et bordures.
Alluvions argilo-calcaires et marais.

IV. — Description de la Boucle de Duclair Rive Gauche.
Description générale.
Traversée I : Berville/Bardouville, situation.
Traversée II : Anneville/Bardouville, situation.

V. — Analyse climatique et microclimatique de la vallée de Basse-Seine.
Pluies — Températures — Nébulosités, de la mer au confluent de l'Epte.

VI. — Analyses pédologiques et granulométriques des sols de la Boucle de Duclair.
Traversée I, de la berge de Berville au plateau de Bardouville.
Traversée II, de la berge d'Anneville au plateau de Bardouville.
Alluvions modernes argilo-calcaires et alluvions anciennes sablo-caillouteuses.

VII. — Zones de cultures et leurs valeurs agronomiques — Assolements et rotations.

Alluvions sablo-caillouteuses, labours :
Avant 1914 — de 1914 à 1939 — depuis 1945.
Alluvions argilo-calcaires :
Banquette de rive, altitude 4 m : herbages plantés et labours.
Arrière Banquette : prairies de fauches et labours.
Marais proprement dits : prés communaux.

VIII. — Résumé et conclusion — Avenir du terroir.

IX. — Bibliographie.

INTRODUCTION

La Haute-Normandie est une vieille région agricole, caractérisée par son limon des plateaux, dont la profondeur et l'excellente structure physique, quand elle est entretenue par des apports humiques et calciques suffisants, fait la richesse. En Seine-Maritime, ces terres recouvrent, outre le Pays de Caux, les petites régions du Petit Caux, d'Entre Caux et Vexin et d'Entre Bray et Picardie, soit environ 80 p. 100 de la surface totale du Département.

Les 20 p. 100 restant comprennent le Pays de Bray (10 p. 100) boutonnière de terrains jurassiques, dont la principale vocation est l'herbage ; la Vallée de Seine (environ 6 p. 100) et des terrains divers pour le reste.

La surface occupée par les terrains d'alluvions anciennes ou modernes de la Vallée n'est donc pas considérable en pourcentage.

Par ailleurs, les alluvions anciennes, sablo-caillouteuses, très filtrantes ne portaient jusqu'ici que de maigres bois ou de maigres cultures.

Les alluvions modernes, calcaro-argileuses sont relativement riches et fortement exploitées quand elles sont à une altitude suffisante, environ 4 m N. G. F. (1) mais elles sont peu utilisables dans les dépressions — les marais — situés entre 2 et 3,75 m N. G. F. ennoyés de nombreux mois de l'année.

Dans l'ensemble, cette partie du département était et reste partiellement délaissée au point de vue agricole.

Cette situation est cependant en train de changer.

D'une part, la Direction des Services Agricoles de la Seine-Maritime, a affecté un Conseiller agricole spécialement à la Vallée de Seine, lequel vient renforcer le travail fructueux et déjà bien enraciné localement du Centre Agricole post-scolaire de Saint-Pierre de Varengeville ; d'autre part, la Station Agronomique de Rouen a décidé de réétudier en détail

(1) N. G. F. = Nivellement Général de la France : 4 m N. G. = 4 m au dessus du zéro de ce nivellement.

les terroirs de la Vallée de Seine, déjà succinctement décrits par le précédent Directeur de la Station Agronomique M. BRIOUX, et par l'un d'entre nous (2).

Grâce aux études scientifiques et aux techniques agricoles modernes, il devient possible de valoriser certains sols, éventuellement de leur découvrir des vocations spéciales. Mais pour profiter pleinement de ces possibilités, il faut en premier lieu avoir une connaissance assez intime des conditions de milieu, sel, microclimat, etc... C'est la raison de cette étude et de celles qui suivront sur le même sujet.

LA BASSE-SEINE DE LA PRÉHISTOIRE AUX RÉCENTS TRAVAUX D'ENDIGUEMENT

Il est bon de consacrer quelques lignes aux circonstances qui ont créé peu à peu la vallée du grand fleuve, pour comprendre la disposition actuelle des terrains et leur pédogénèse.

On trouvera dans un travail antérieur des mêmes auteurs, (Étude granulométrique sur les terrains du méandre de Duclair — Revue des Sociétés Savantes de Haute-Normandie — Sciences nº 9 — 1958) un chapitre un peu plus détaillé sur l'origine et les transformations de la Seine.

La direction générale du cours d'eau, dans sa partie normande, remonte sans doute à bien des millions d'années, mais sa position dans la large vallée actuelle, a subi de très nombreux changements, tant en altitude qu'en coordonnées horizontales.

Nous retrouvons, à des hauteurs de l'ordre de 140 m et plus d'après CHAPUT (3) des sables rouges, granitiques, à nombreux silex roulés qui, dans la Forêt de Mauny, à la racine du méandre de Duclair, par exemple, sont l'indice d'un passage très ancien de notre Seine.

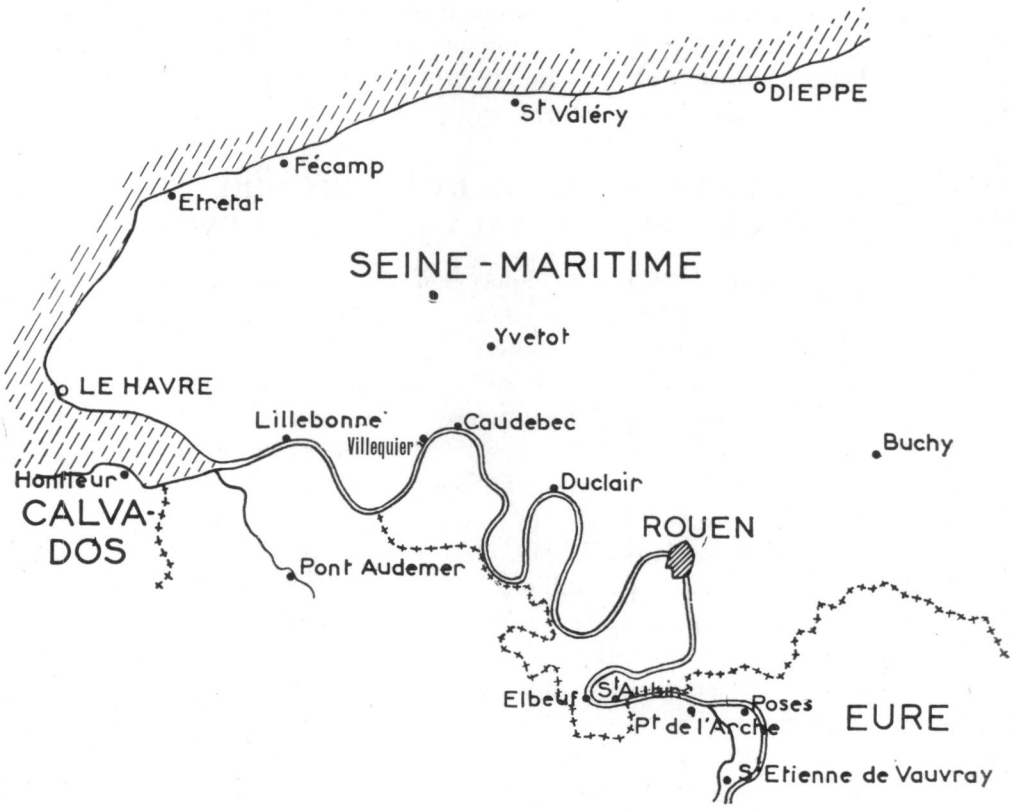
A l'est de Mauny, un petit méplat de 100 m d'altitude, homologue d'un dépôt en forêt de Roumare, sur la rive droite, atteste encore, pour CHAPUT, la présence d'une ancienne terrasse du fleuve.

D'autres crans marquent d'autres temps d'arrêt ou de recoupement d'anciennes berges. C'est toute l'histoire des terrasses, parfois si controversées dans le détail, mais qui ne peuvent faire de doute dans le principe.

Nous savons, que le niveau des mers et de la Manche en particulier, a subi de larges oscillations pendant les quelques centaines de mille ans ou le million d'années qu'a duré l'époque glaciaire. A plusieurs reprises, et en particulier pendant le dernier retour du froid connu sous le nom de Würm II, la Manche fut exondée.

Son fond n'était autre alors que la vallée de la Seine préhistorique, et de ses affluents, aujourd'hui redevenus fleuves côtiers de la France et de l'Angleterre.

Peu avant le début du dernier retrait des glaces, il y a environ 20 000 ans, on peut estimer que la Seine se jetait dans l'Océan au-delà de la ligne Brest-Pointe de Cornouailles, à environ 500 km de son embouchure actuelle. Autrement dit, le site du Havre, naturellement bien différent de l'actuel, se trouvait sur le cours moyen.



Carte I. — Vallée de Basse Seine. Emplacement des postes météorologiques.

Il faut souligner, pour la bonne compréhension des terrains et des mouvements de la nappe phréatique, que la Seine coulait alors sur un fond rocheux de calcaire cénomanien glauconieux, tapissé de galets de silex ainsi que de sables plus ou moins grossiers. Ce lit, au Havre, était environ 30 m plus bas que les berges actuelles.

Il ne faut pas oublier qu'à cette même époque, le climat de la Seine-Maritime était très analogue à celui du Nord du Canada ou de la Russie : C'était une toundra polaire, à sous-sol constamment gelé, sans forêt, car le glacier qui couvrait la Grande-Bretagne et l'Islande s'avançait jusqu'à la Severn.

Les cours d'eau n'étaient donc libres de glaces que quelques mois de l'année et les berges, nues, se recouvraient de couches de graviers et de

limon au moment des débâcles. Après quelques semaines d'un ensoleillement qui pouvait être intensif, le limon calcaire s'envolait facilement sous les vents violents périglaciaires que n'arrêtait nulle végétation importante ; il se déposait en partie entre les proches interfluves, renforçant l'épaisseur de l'ergeron déjà accumulé lors de précédentes glaciations. Nous montrerons plus loin que la composition granulométrique des sables siliceux des alluvions modernes est sensiblement constante dans de larges épaisseurs de profils et par ailleurs, identique à la composition granulométrique d'épaisses couches de limon des plateaux.

Quand le niveau marin s'est élevé à nouveau, au début du Flandrien, il a fini par atteindre notre présente côte normande, puis commencé à remblayer la vallée de cours moyen en amont du Havre. On estime que le niveau actuel fut atteint il y a environ 6 000 ans et même moins.

Au cours de cette remontée de la plaine alluviale, des périodes tranquilles ont permis l'installation de tourbières que l'on retrouve, nombreuses, plus ou moins enfouies le long du fleuve, ou parfois encore en activité, comme pour le Marais Vernier (avant la récente intervention humaine) et le Marais de la Harelle à Heurteauville.

L'un de nous a décrit récemment les différentes couches tourbeuses rencontrées dans les sondages de la Basse-Seine, entre Rouen et la Mer (Bulletin Association française pour l'étude du Sol — Mars 1958).

L'étude palynologique du Marais Vernier par les spécialistes de l'Université de Strasbourg (10) a montré qu'au moment de l'établissement de cette tourbière, le stade du bouleau et du pin dans la réinstallation des forêts après toundra était déjà dépassé et que la phase de la chênaie mixte domine dès la base. Cela nous reporte donc, d'après le tableau des types d'évolution forestière flandrienne de ces spécialistes, entre 7 000 et 8 000 ans, avant l'époque actuelle, à la fin du mésolithique.

Or, les plus grands fonds de la tourbe, au Marais Vernier, sont entre — 4 et — 5m N. G. F. Comme le zéro N. G. F. correspond sensiblement au niveau moyen de la mer et que l'onde de marée en Basse-Seine, règle le niveau moyen des alluvions à un peu plus de 3 m, on peut très bien admettre que la Manche a monté de 7 ou 8 m depuis 8 000 ans, et corrélativement, les alluvions modernes calcaro-argileuses.

Il ne faut pas oublier que le niveau des terrains alluvionnaires des bords de Seine s'établit en fonction de l'onde de marée de haute mer, qui atteint pratiquement la même cote du Havre à Rouen : 8 m au-dessus du zéro des cartes marines du Havre, soit 3,16 N. G. F. C'est en effet la hauteur moyenne des alluvions modernes, comme nous le verrons plus loin (2 à 4m).

La vallée de Basse-Seine se présente à nous comme une vaste entaille dans le massif crétacé cénomanien/turonien/ sénonien, d'âge moyen voisin de 80 millions d'années, qui après son soulèvement par bombements à

grands rayons de courbure vers la fin du tertiaire, en écho aux plissements des régions alpines, s'est trouvé entamé par surimpression des méandres de la Seine antique, après déblaiement des éléments de la plaine pliocène, lesquels supportaient son précédent lit.

Par le jeu des surrections lentes du plateau cauchois et des abaissements répétés du niveau marin, le fleuve a attaqué plus ou moins rapidement la roche crayeuse, approfondissant ses méandres tout en les déplaçant lentement vers l'ouest et tout en glissant sur les parties convexes des courbes en y déposant les alluvions sablo-caillouteuses d'un fleuve en plein travail.

Parvenu au plus bas de sa course, il y a moins de 20 000 ans, le fleuve a vu son niveau se relever peu à peu, en correspondance avec le retour de la mer dans la vallée de la Manche. Par un alluvionnement intense de limon calcaro-argileux, il a créé peu à peu une plaine fluviale, qui n'a pris sa vaste extension actuelle, dans la région de l'estuaire qu'à la suite des premiers endiguements destinés à canaliser le lit du fleuve et à l'approfondir.

Il nous reste à dire quelques mots de ces travaux, contribution involontaire à la géologie du quaternaire, et à la pédogénèse.

Avant 1834, date de la confection de la première carte un peu précise de la Vallée de Seine, nous n'avons que peu de renseignements sur les dépôts consolidés ou provoqués de main d'homme.

D'après des investigations du service de la Seine-Maritime des Ponts-et-Chaussées concrétisées dans une carte des alluvionnements à l'échelle du 1/80 000 ces consolidations étaient pratiquement nulles, dans l'entrée de l'estuaire, avant 1710. Elles se résument dans un agrandissement de quelques centaines d'hectares du site du Havre, à l'est de la ville et dans un liseré de quelques dizaines de mètres jusqu'au Cap du Hode rive droite et jusqu'à la pointe de la Roque rive gauche.

Ces pointes, jusqu'en 1863, ainsi que celles de Tancarville et de Quillebœuf, s'avancèrent réellement soit dans l'eau douce du fleuve, soit dans l'eau salée du flot, remontant deux fois par jour.

Entre le Cap du Hode et Tancarville, la consolidation ancienne était plus importante et pouvait atteindre 600 m de largeur. En réalité, tous ces terrains étaient très fluctuants, parfois nuls, parfois très larges, suivant les divagations du fleuve.

En regard, la vallée de la Risle avait été fortement rétrécie, depuis Pont-Audemer, mais elle restait ouverte à la divagation du cours d'eau sur 500 ou 600 m de largeur.

Nous avons ensuite, toujours sur la rive gauche, le Marais Vernier qui fut l'objet de plusieurs tentatives d'assainissement dans le passé, sans doute au VIIeme siècle par les moines de l'Abbaye de Jumièges et en tous cas après 1617, date à laquelle le Hollandais BRADLEY s'engagea à

achever le dessèchement en trois ans. Il renforça la bande étroite d'alluvions qui séparait à ce moment le Marais du fleuve, d'où le nom de Digue des Hollandais qu'a conservé cette levée de terre.

D'autres travaux ont encore eu lieu, jusqu'au tout dernier, commencé en 1951, dans lequel le laboratoire des Plantes Fourragères de l'I. N. R. A. à Rouen a joué un certain rôle en ce qui concerne l'établissement des nouvelles prairies sur les parties assainies.

Sur la rive droite, l'estuaire de la rivière du commerce, qui permettait au temps des Romains et même jusqu'au Moyen-Age, la remontée des vaisseaux jusqu'à Lillebonne (1) s'était progressivement envasé. Peu avant 1710, l'eau du flot n'arrivait plus qu'à 4 km de l'église ce qui représentait environ 1 500 m de largeur d'alluvions au droit du centre de la concavité des falaises.

Un peu plus loin, depuis la pointe de Petitville jusqu'au début de Villequier en passant par Saint-Maurice d'Etelan et Norville, des atterrissements importants avaient été réalisés et plus ou moins consolidés avant 1710, mais suivant des modalités sur lesquelles nous n'avons pas recherché de renseignements.

Ces atterrissements, qui atteignaient presque la limite actuelle du fleuve en face de Vieux Port soit à environ 3 km du talus d'alluvions anciennes portant les maisons de Petitville et de Saint-Maurice d'Etelan, étaient assez instables, et les berges se déplaçaient fréquemment au gré des crues et des tempêtes.

Plus loin encore, mais sur la rive gauche, en face Caudebec, la carte des Ponts et Chaussées signale des atterrissement de largeurs variables, de l'ordre de 1 km sur la commune de Saint-Nicolas-de-Bliquetuit.

Ces alluvions forment un ensemble avec celles encore plus larges de la Mailleraye/Heurteauville, en amont, sur la rive gauche, et ceux du Trait, sur la rive droite.

Cette masse alluvionnaire est découpée par un curieux petit méandre qui trouve son explication dans le rejet de la Seine, commune du Trait, au niveau d'un ancien confluent avec la Sainte-Austreberthe, rivière aujourd'hui capturée par le méandre d'amont, celui de Duclair.

Cette masse alluvionnaire est donc relativement vieille dans son ensemble.

La morte-vallée de la Sainte-Austreberthe entre Duclair et le Trait est bien visible dans la nature et sur la carte. Elle sert aujourd'hui de passage à la route nationale 182.

Les autres dépôts d'alluvions des boucles de Jumièges, Duclair, la Bouille, Rouen, Elbeuf etc... sont également très anciens, mis à part quelques petites variations locales.

En particulier, la boucle de Duclair que nous examinerons spéciale-

ment semble être consolidée depuis de très nombreux siècles, sans doute depuis le 3eme siècle après J. C.

Entre 1710 et 1834 furent effectuées quelques acquisitions sur les eaux. Tout d'abord, la Risle fut définitivement régularisée. Puis une large prairie fut consolidée en avant de la digue des Hollandais, au Marais Vernier, entre le flanc est de la pointe de la Roque et le flanc ouest de la pointe de Quillebeuf. Sur la rive droite, les alluvions de l'anse de Lillebonne furent accrues à Port-Jérôme, ainsi que les alluvions entre Petitville et Villequier.

Sur la rive gauche, en face Caudebec, plusieurs îles furent cernées, et, entre Vatteville et la Mailleraye, les berges furent étoffées.

Mais les remblayements importants n'eurent lieu qu'après les premiers endiguements réalisés dans le but d'approfondir et de régulariser le cours de la Seine, afin de permettre à des navires de plus en plus gros de remonter jusqu'à Rouen.

On a peine à imaginer aujourd'hui le petit tonnage des bateaux qui arrivaient à Rouen au début du siècle dernier, et le temps — souvent plus d'une semaine — dont ils pouvaient avoir besoin(5). Le fleuve s'étalait en effet sur plus de 1 km de large en maints endroits, et le lit n'était qu'une succession de fosses, séparées par des seuils que les plus gros navires — 3 m de tirant d'eau — ne pouvaient franchir qu'à marée haute.

Les premières digues maçonnées furent exécutées en 1848-1849 entre Villequier et Vieux-Port. Elles ne firent pas gagner beaucoup aux riverains, mais amenèrent le fleuve à sa largeur actuelle, soit environ 400 m à cet endroit.

Entre 1851 et 1855, furent construites la digue Nord de l'anse de Lillebonne et de 1853 à 1859 la digue sud en face du Marais Vernier.

A l'arrière de ces deux ouvrages très importants, les alluvions déposées à marée haute colmatèrent rapidement les vides et firent gagner environ 1 600 hectares sur la rive droite et 2 000 sur la rive gauche.

Tout cela constitue aujourd'hui de réelles prairies dont nous aurons l'occasion de reparler dans un mémoire ultérieur.

Dans la même période furent exécutées les digues nord et sud de l'anse de Caudebec.

Au Nord, la digue régularisa la berge, mais au Sud elle élimina 3 grandes îles en les soudant aux alluvions de Vatteville/La Mailleraye, ce qui représente un gain de plusieurs centaines d'hectares.

Parmi ces îles se trouve Belcinac, dont les multiples avatars d'existence ; de position, de forme et de possession, nous ont été contés par COCHET, repris par JULES SION dans « les Paysans de la Normandie Orientale » (11) depuis le don qui en fut fait à l'Abbaye de Saint-Wandrille au VIIeme siècle.

Entre 1863 et 1867 les digues Nord et Sud de l'estuaire, entre l'em-

bouchure de la Risle et Quillebeuf ou Tancarville, constituèrent des prolongements de celles construites entre 1851 et 1859.

La digue sud prolongée va accroître sensiblement la surface des prairies entre le Marais Vernier et la Seine.

La digue nord prolongée va créer d'énormes surfaces utilisables entre le Havre, le Cap du Hode et Tancarville, de l'ordre de 60 km² après les travaux de 1920.

On trouvera quelques indications sur ces atterrissements, ainsi qu'une grande carte au 1/80 000 de la région, dans l'étude de Brioux et Jouis intitulée « Les alluvions anciennes et modernes de la Vallée de Seine » Annales Agronomiques 1° trimestre, 1942.

Notons en passant que l'influence des dernières digues s'étant révélée défavorable à l'instauration d'un bon chenal, la digue sud vient d'être rescindée et prolongée à l'ouest d'Honfleur. La digue nord doit également être modifiée.

Telle est, en raccourci, l'histoire de ces endiguements modernes, qui en l'espace d'un siècle, ont complètement modifié l'allure du fleuve, les possibilités portuaires de Rouen, et accessoirement, créé des dizaines de milliers d'hectares de riches prairies et même de terrains cultivés.

LES ANCIENNES CULTURES DE LA VALLÉE DE SEINE

Un peu d'histoire

Nous avons dit, dans l'introduction, que dans l'ensemble, les terres de la Vallée de Seine étaient naturellement pauvres, soit sablo-caillouteuses, des « garennes » ou « sablons », soit marécageuses des « marais ».

C'est ce que reflètent les écrits des anciens auteurs dont JULES SION a rassemblé quelques fragments dans son magistral ouvrage sur « Les Paysans de la Normandie Orientale » (11).

La culture ancienne dans les alluvions sablo-caillouteuses et leurs bordures

S'il y eut jusqu'au XVIIeme siècle, des vignes sur les coteaux, ce fut surtout en amont de Rouen, au-delà de Pont-de-l'Arche et sans doute bien peu en Basse-Seine.

Sur les garennes des anses convexes, on ne rencontrait bien souvent que des landes, moins boisées que de nos jours, et soumises aux moutons — Elbeuf, qui travaillait la laine depuis de nombreux siècles pouvait en acheter les toisons —.

Malgré cela, les troupeaux n'étaient pas nombreux, car la lande était pauvre et la propriété morcelée.

Dans les parties cultivées, le blé était rare, sauf dans les champs avoisinant le plateau, là où un peu de limon, transporté par les eaux, renforçait la valeur du sol. On ne récoltait donc que le seigle, l'orge, et parfois le sarrasin, et pour quelques quintaux à l'hectare.

Les « garennes » ou « sablons », quand ils n'étaient pas trop pauvres, convenaient bien à la culture de la pomme de terre, sinon pour le rendement, du moins pour la précocité et la valeur sanitaire. C'est à partir de la Vallée de Seine, surtout en amont de Rouen, que cette culture se développa en Normandie. Un agronome de Rouen, MUSTEL fut peut-être un précurseur de Parmentier, car il fit campagne pour ce légume en 1770, alors que les tubercules ne servaient au début qu'à l'alimentation du bétail.

Comme il n'y a rien de nouveau sous le soleil, on tenta de valoriser dès le XVIIeme et le XVIIIeme siècle, les terres pauvres sablonneuses et aussi les terres plus riches d'alluvions modernes.

On signale l'introduction en 1620, de la culture du tabac à Léry, en amont de Rouen, sur le limon des inondations qui survenaient presque chaque année en fin d'hiver. En 1675, la culture du tabac était réputée de grand revenu, mais elle était combattue par les financiers de la ferme du tabac et elle finit par disparaître.

Au début du XVIIIeme siècle, le chardon à foulon était cultivé presque en exclusivité par une quinzaine de paroisses du côté de Pont-de-l'Arche. Les capitules étaient employés dans les fabriques de drap de Louviers et d'ailleurs, mais aussi exportés en Allemagne et en Angleterre, car c'était un véritable crû de cardes, caractérisé par des crocs fins et résistants.

Quand l'exportation était interdite, pendant les guerres de Louis XIV. les producteurs étaient réduits à la misère, et d'un autre côté, les industriels Hollandais par représailles, faisaient suspendre la vente du blé aux français en disette.

Dans les sols légers de Léry, Elbeuf, Oissel se répandit, au milieu du XVIIIeme siècle, la culture de la gaude, après fèves ou haricots et avant froment.

La couleur jaune tirée de la gaude était aussi article d'exportation, notamment en Hollande, par le port de Rouen.

A la même époque et toujours dans ces mêmes régions, très favorisées à ce point de vue par une certaine étendue des pédoncules alluvionnaires et par la proximité des fabriques textiles : Rouen, Elbeuf, Louviers, etc... on acclimata la culture de la garance.

Un arrêt du conseil en date du 24 février 1756 décide « que ceux qui entreprendront de cultiver la garance dans des marais et autres lieux non cultivés, ne pourront pendant 20 ans, être imposés à la taille, eux ni leurs employés ».

DAMBOURNEY, actif secrétaire de la Société d'Agriculture de Rouen,

fit un essai en 1757 sur 70 arpents de la forêt du Rouvray, en semant des graines de garance de Smyrne.

Cette rubiacée aux longues racines devait trouver un sol léger, mais contenant cependant un peu d'argile pour retenir l'humidité et les produits nutritifs. Ces sols devaient être bien labourés et bien fumés. Certains champs à la limite des alluvions anciennes et modernes convenaient parfaitement.

Malheureusement, la dîme, prélevée sur le produit brut, sans tenir compte des frais d'exploitation qui étaient élevés, finit par décourager les fermiers.

Par ailleurs, la main-d'œuvre locale trouvait plus profitable de s'engager directement dans les filatures et les tissages.

Notons encore que les paysans de la Vallée louaient leurs chevaux et même leurs bras pour hâler les navires le long du fleuve, surtout en certains passages difficiles. Le sous-préfet de Louviers constatait en 1799 que les habitants de Poses prenaient trop peu soin de leurs terres. En fait ils délaissaient leurs « garennes » arides pour la batellerie.

La culture ancienne dans les marais

Nous avons déjà parlé de quelques cultures ayant prospéré un certain temps aux limites des alluvions anciennes et modernes, mais la plus grande partie des alluvions modernes étaient autrefois marécageuses.

De grandes étendues ne produisaient qu'une herbe grossière, ou plutôt des roseaux et des carex. Le paludisme était endémique et les riverains du Marais Vernier, notamment étaient éprouvés.

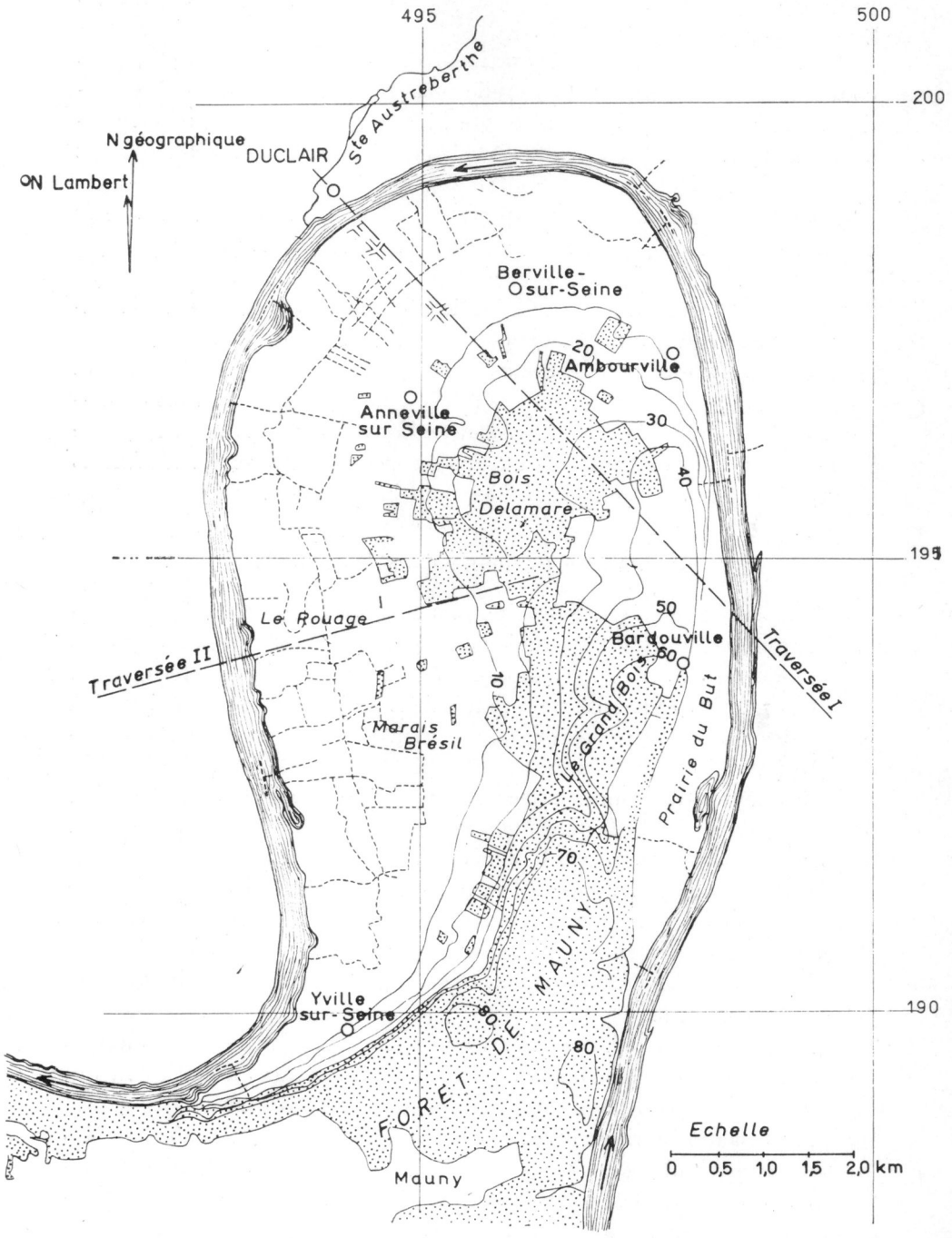
Les fièvres d'automne amenaient une recrudescence de la mortalité, et Rouen ne fut pratiquement délivré des épidémies qu'à partir de 1850.

Les riverains des fleuves côtiers de la Manche n'étaient pas épargnés, car les eaux stagnaient près des embouchures encombrées de cordons de galets. Ce n'est qu'à partir de la seconde moitié du XIXeme siècle que l'évacuation des eaux par des buses munies de vannes permit aux terrains bas de s'assainir et amena l'installation de belles prairies ou de jardins maraîchers.

Mais revenons à la Seine. Les bords du fleuve (et de maints autres cours d'eau) étaient encombrés de vases et de plantes aquatiques, qui ralentissaient le passage des crues et les forçaient à s'étendre.

A plusieurs reprises, les riverains avaient ouvert ou renouvelé des fossés perpendiculaires et parallèles à la Seine, mais ils finissaient toujours pas être délaissés, généralement à la suite de quelque trouble économique ou politique, y compris la guerre.

Quand ils étaient entretenus, ils drainaient les prairies des marais au moment des plus basses eaux du fleuve, mais quand la vase s'y était forte-



Carte II. — Vallée de Seine. La Boucle de Duclair.

ment déposée il se constituait des seuils par-dessus lesquels le flot entrait, mais ne pouvait ressortir.

C'est ainsi que des bandes de plusieurs centaines de mètres de largeur parallèles au fleuve, pouvaient rester inondées une grande partie de l'année, car les alluvions modernes, dont nous verrons plus loin la composition granulométrique, sont très imperméables quand elles sont riches en argile.

En Basse-Seine, dans le méandre contournant la forêt de Brotonne, entre le Trait et Saint-Wandrille, se trouvait l'un des hauts points du lit, le seuil tourbeux du banc des meules (5) lequel s'opposait fortement à la remontée du flot. Celui-ci s'étalait donc deux fois par jour, en aval de ce barrage naturel, rendant toute utilisation des berges, d'ailleurs peu précises, impossible.

Ce sont les endiguements successifs, dont nous avons parlé dans la partie historique, qui permirent peu à peu, depuis un siècle environ, de consolider les berges, de les élargir et de permettre enfin l'établissement de prairies de qualité et même, en certains endroits, de riches labours.

Ainsi, les « marais » servaient tant bien que mal de pâtures communes, et ce système s'est perpétré jusqu'à nos jours, avec toutefois des améliorations. On y récoltait aussi un mauvais foin qui trouvait preneur auprès des rouliers, très nombreux à cette époque.

Par la suite, les berges, généralement consolidées à 4 m N. G. F, sont devenues, nous le verrons dans le 5e chapitre, de riches prés vergers.

Nous arrêterons là ces considérations sur les anciennes cultures de la Vallée de Seine, et nous débuterons le 5e chapitre par l'état de cultures à la veille de la guerre de 1914 pour le conduire jusqu'aux prévisions d'avenir pour la région étudiée.

DESCRIPTION GÉNÉRALE DE LA BOUCLE D'ALLUVIONS ANCIENNES ET MODERNES AU SUD DE DUCLAIR

Parmi les quelques méandres possibles, nous avons choisi, pour notre première étude, la boucle située au sud de Duclair.

Cette boucle, est fortement individualisée et présente sans ambiguité la succession classique des alluvions anciennes, depuis les hauteurs de la forêt de Mauny jusqu'aux alluvions modernes, parfois marécageuses des bords de la Seine.

La longueur de cette sorte de presqu'île, qui avance au Nord dans le Pays de Caux, est de 10 km depuis sa racine, au niveau de Mauny — la plus grande largeur, entre Anneville et Bardouville est de 5,5 km.

Sur la carte schématique, II, on verra tout d'abord la boucle du

fleuve, avec les petites irrégularités de ses berges, surtout du côté convexe (rive gauche) résidus d'anciens passages du courant ou réafouillement des berges lors de grandes crues ou de grandes marées.

Toutes ces irrégularités sont d'ailleurs en voie de disparition par l'action ininterrompue du service des Ponts et Chaussées.

Entre Berville/Seine et Yville, les chemins longeant les berges s'établissent au voisinage de 4 m N. G.

A cette altitude, certaines grandes marées d'hiver peuvent les submerger temporairement.

Toutefois ces chemins sont rares, car la plupart des propriétés aboutissent directement sur la berge. Il y a de nombreux fossés.

Les maisons et bâtiments sont très près du fleuve, généralement entre une dizaine et une centaine de mètres, dans une partie légèrement surélevée du pré-verger par exemple 5 m N. G. En période de grande crue, beaucoup de maisons sont léchées ou envahies par l'eau.

Le chemin de circulation qui dessert ces propriétés est grossièrement parallèle au fleuve, entre 200 et 300 m de la rive, et l'altitude de la chaussée est égale ou peu supérieure à 4 m N. G.

Au Nord-est de la boucle, à Ambourville, les maisons sont groupées différemment, entre 5 et 10 m d'altitude, le long de la route reliant Ambourville à Berville.

Cette route fait un angle moyen de 30° avec la berge ; il en résulte que les premières maisons, au sud, sont à environ 150 m du fleuve, et les dernières, au nord à environ 800 m. Un peu plus loin, au nord, les premières maisons de Berville se trouvent à nouveau à proximité immédiate de la Seine.

Sur ce côté est de la boucle, les chemins bordant la Seine sont plus nombreux, et toujours à 4 m N. G.

Par ailleurs la bande des alluvions modernes devient très étroite, principalement, à la limite des communes d'Ambourbille et de Bardouville.

Cette zone est en effet un point d'articulation du cours d'eau. Après avoir glissé de Montigny à Sahurs (rive droite), en créant la boucle aujourd'hui occupée par la forêt de Roumare, et corrélativement de Mauny à Berville-sur-Seine (rive gauche) dans la boucle de Duclair, la courbure au niveau de la Bouille et de Caumont est devenue suffisamment accentuée pour commencer à rejeter le fleuve vers le N. E. Il en est résulté un décollement du cours d'eau de la falaise, au lieu dit Beaulieu, à la limite des communes de Mauny et de Bardouville, créant une langue d'atterrissages sablo-caillouteux, qui surmontée plus tard par les alluvions récentes, formera « la prairie du But ».

En s'écartant des hauteurs de Bardouville, le fleuve a retaillé dans les alluvions qu'il venait de déposer à Quevillon et à Saint-Martin de Bos-

cherville. A l'époque de ce travail, il s'agissait toujours d'alluvions sablo-caillouteuses. Elles se trouvent aujourd'hui enfouies sous les alluvions modernes du remblayage Flandrien.

Mais, continuant sa course au nord, le fleuve s'incurvait d'Ambourville à Anneville s/Seine, tout en descendant vers Duclair. C'est précisément à la limite actuelle des communes d'Ambourville et de Bardouville que se situait le point d'inflexion des deux courbures ; point relativement stable dans le temps, d'où l'étroitesse de la berge en cet endroit.

La disposition des fermes de Bardouville est à l'opposé de celles de la partie ouest : Anneville/Yville. Elles sont en effet toutes en haut et en bordure de la falaise morte, soit à une altitude variant de 40 à 60 m du nord au sud.

Un coup d'œil sur la carte montre que les paysans ont manifestement essarté la forêt pour se créer une zone de cultures, d'ailleurs très maigres. Cette grande clairière est insérée entre le Bois Delamare au nord et le Grand Bois au sud.

En outre, les habitants de Bardouville utilisaient l'étroite prairie du But, très marécageuse jusqu'à ces dernières années (le centre est à l'altitude +3m).

Au nord et à l'ouest de la boucle, entre le chemin rural de desserte des fermes en bordure du fleuve et la route départementale 45 ou son prolongement par la route Berville/Ambourville/Bardouville, se trouve une large zone de prairies basses souvent marécageuses.

Partant d'une largeur inférieure à 100 m au point d'inflexion entre Ambourville et Bardouville, la zone atteint 1 000 à 1 200 m sur les communes de Berville et d'Anneville et même 1 800 m dans le Marais Brésil, à la limite des communes Anneville, Yville, pour revenir bientôt à zéro le long de la falaise faisant face au Mesnil-sous-Jumièges, à l'autre extrémité d'Yville, autrement dit, à la racine ouest de la boucle.

Entre Ambourville et Berville, les prairies sont relativement hautes, environ 4 m et ne mouillent pas souvent.

De Berville à Yville les parties centrales sont souvent très basses, jusqu'à 2 m N. G. et dans ce cas, sont régulièrement inondées en hiver et aux moindres crues.

Toutes ces prairies sont appelées « Marais », par exemple : le Marais du Parc, Marais du Patis, le Marais Brésil, etc... Elles sont généralement en pâtures communales c'est-à-dire que chaque habitant de la commune a le droit d'y faire pâturer chaque année un certain nombre de têtes de bétail.

Les marais sont coupés de nombreux fossés, et les chemins vicinaux surélevés qui les traversent sont fermés à chaque extrémité par des barrières que le voyageur se doit de refermer après son passage, pour éviter que les bêtes ne s'échappent.

C'est à la limite des marais, opposée à la Seine, que se fait la rencontre avec les alluvions sablo-caillouteuses anciennes.

Ces alluvions anciennes plongent en une pente très faible sous les alluvions modernes, ou plus exactement, ce sont les alluvions modernes qui ont recouvert les alluvions anciennes lors de la remontée progressive du niveau de la Seine.

Si l'on tire un trait sensiblement perpendiculaire au fleuve, et aux lignes de niveau, depuis la berge face à Duclair, jusqu'à la partie la plus élevée des alluvions anciennes dans cette direction (Traversée 1,) on note d'abord une sorte de banquette d'alluvions modernes, de 300 à 400 m à la cote + 4.

Vient ensuite une partie légèrement déprimée, le marais communal, qui en cet endroit a 500 à 600 m de large, et une cote voisine de + 3.

L'extrémité sud du marais se redresse, d'ailleurs très peu, au contact des alluvions anciennes sablo-caillouteuses, qui commencent à affleurer à environ 900 m du fleuve.

La pente de ces alluvions est de 1,57 p. 100 en moyenne ; entre 1,5 et 2,5 km. Elle s'abaisse à 0,95 p. 100 de 2,5 à 5 km. Le terrain culmine alors à 42-43 m d'altitude sur la commune de Bardouville, pour s'infléchir brusquement par la falaise, jusqu'à la banquette étroite d'alluvions modernes prolongeant la prairie du But.

La base de la falaise est à 3,75 N. G. alors que le terrain se redresse à 4 m en bordure de la Seine. Cette dépression le long des falaises mortes de la Seine par rapport aux alluvions riveraines est très fréquente. Dans l'ordre naturel, elle s'explique par le fait qu'un cours d'eau surélève d'abord, à chaque crue, les terrains voisins du cours actuel. Ce phénomène a contribué à isoler des plans d'eau allongés le long des rives, lesquels se transforment en tourbières actives tant que la remontée du fleuve n'est pas trop rapide.

Si la remontée est rapide, ou si un changement assez brusque de la berge protectrice se produit par suite d'une cause locale, la tourbière est rapidement submergée par les alluvions.

C'est ce qui s'est produit au début du troisième siècle après Jésus-Christ, lors d'une remontée caractérisée de la mer signalée par ailleurs au Pays-Bas et sur les côtes bretonnes. En effet, la partie supérieure de la tourbe sous-jacente aux alluvions modernes d'Anneville s/Seine, datées au Carbone 14 par le laboratoire d'électronique physique de Saclay [1] a cessé d'être vivante environ 180 ans après J. C.

Elle peut parfois se reformer ultérieurement à la même place, ce qui explique les couches alternées de tourbe et de limon, que l'on rencontre fréquemment en profondeur par exemple dans la région Lillebonne.

[1] Dirigé par Mme DELIBRIAS, que nous remercions ici bien vivement.

En Basse-Seine, où une grande partie sinon la totalité des rives a été consolidée de mains d'hommes, le dépôt des alluvions modernes suit la même loi. L'altitude du terrain décroît quand on s'éloigne du fleuve, jusqu'au moment où le contact avec les alluvions anciennes, ou la falaise morte, le redresse.

Dans la boucle de Duclair, que nous décrivons présentement, était installée jusqu'à une époque récente, une tourbière importante, qui affleure dans les régions basses du marais, mais qui se trouve enfouie sous des épaisseurs croissantes d'alluvions modernes quand on se rapproche du fleuve. Nous avons déjà dit que sa partie supérieure datait de 180 après J.C. Nous avons trouvé la tourbe à 90 cm de profondeur au début d'une prairie située à 580 m de la berge, puis vers 63 cm à 640 m et vers 50 cm à 840 m.

Une particularité des prairies installées sur une alluvion moderne de quelques décimètres d'épaisseur, reposant sur la tourbe, est l'effet de coupure pour la circulation verticale de l'eau.

En effet, si l'on creuse un trou à la sonde, le trou d'abord sec se remplit assez rapidement d'eau dès que la tourbe est atteinte. Cette eau se met en équilibre avec le plan moyen de l'eau dans les fossés à l'époque du forage.

Réciproquement, dans une prairie qui n'est pas ou mal drainée, l'eau de pluie ou éventuellement l'eau des crues, reste indéfiniment sans s'écouler dans le sous-sol, d'où l'aspect marécageux de certaines parties basses. Cette eau superficielle ne disparaît qu'en été, évaporée par les rayons solaires.

Une seconde traversée a été étudiée, toujours perpendiculairement au fleuve et aux courbes de niveau, en partant de la rive ouest de la boucle, commune d'Anneville s/Seine, et débutant au lieudit « Le Rouage » pour aboutir au sud de la plaine des Moulins sous les bois recouvrant la partie haute des alluvions anciennes.

Le Marais, comme déjà indiqué, est ici assez large — environ 1 500 m. A 500 m au sud de notre traversée, la largeur est maximum, avec la cote + 3,70 à 1 800 m du fleuve et de vastes parties basses centrales entre 2 m et 2,50 m N. G. F.

Vraisemblablement, depuis des siècles, et même encore de nos jours par l'intermédiaire des fossés, une lente circulation parallèle s'établit par marées hautes en hiver, sur ces marais.

En avant du marais, la banquette des 4 m N. G. F. a une largeur de 200 à 300 m.

En arrière, les alluvions anciennes forment une légère butte atteignant la côte + 7 entre les mouettes et la grève, vis-à-vis d'une ancienne carrière de sable et cailloux, pour redescendre à + 5 m à la traversée de la départementale 45 et remonter entre 6 m et 9 m à l'extrémité de la

plaine du Moulin puis à 42 m à travers bois au croisement avec notre traversée 1.

Dans l'ensemble, le paysage est le même que dans la traversée 1, sauf que la partie basse est encore plus typique du « Marais «.

CLIMATS ET MICRO-CLIMATS
SOLS ET SOUS-SOLS

Le climat général de la Seine-Maritime, d'après la carte des climats de la géographie physique de la France, de E. DE MARTONNE (4) est un climat océanique typique du nord-ouest mais un peu atténué à quelques kilomètres des côtes.

Ce climat, est soumis à l'influence de la mer, par ses vents dominants d'ouest et de sud-ouest. Il est relativement égal et humide. Il pleut en moyenne environ 1 jour sur 2 et la hauteur annuelle est de l'ordre de 800 mm.

La température moyenne annuelle est comprise entre 10 et 11°, plus basse sur le plateau cauchois qu'au niveau de la mer.

Il y a, bien entendu, des variations sensibles d'une année à l'autre, et aussi, dans la même année, des différences importantes dues aux micro-climats des différents postes. Nous ferons ressortir ci-après les caractéristiques climatiques pour la Vallée de Seine.

Il convient toutefois de souligner que les informations que l'on peut recueillir dans la littérature sont plus qualitatives que quantitatives, car la plupart des postes météorologiques ne furent pas régulièrement tenus. Beaucoup n'ont eu qu'une existence de quelques années, liée à la bonne volonté d'une personnalité locale.

Seuls, des postes officiels de la météorologie Nationale, comme celui installé depuis 1945 au champ d'aviation de Rouen-Madrillet, présentent une rigueur et une continuité dans le travail permettant des déductions sérieuses. Malheureusement ces postes sont tellement éloignés les uns des autres qu'ils ne peuvent donner que des indications climatiques d'ordre très général.

Force nous est donc de nous rabattre sur le dépouillement des résultats des postes semi-officiels ou même d'amateurs, dont on peut estimer la valeur des observations, pour une période donnée, par la connaissance directe des lieux et des personnes.

J. SANSON, par son travail sur le climat de la Normandie (9), a déjà coordonné au mieux les résultats d'un assez grand nombre de postes, dont les relevés se trouvaient dans les archives de la météorologie nationale.

Voici pour la hauteur moyenne de 800 mm correspondant à la période 1891-1930, la répartition mensuelle des pluies de la Seine Maritime

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
67	53	59	56	55	57	65	67	64	85	83	89	800

La Vallée de Basse-Seine séparant, en gros, le département de la Seine-Maritime de celui de l'Eure, il est utile de donner les moyennes pour ce dernier département et pour la même période :

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
49	40	48	45	50	53	60	50	48	68	59	64	634

On constate que l'Eure est relativement sec par rapport à la Seine-Maritime. Il n'a pas, il est vrai, de contact direct avec la mer, donc pas de pluviomètre sur les côtes, contrairement à la Seine-Maritime et au Calvados.

Le Calvados occupe une situation maritime, qui rend sa comparaison utile :

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
69	58	64	57	60	58	66	62	58	85	82	91	810

On constate que la moyenne annuelle est pratiquement identique à celle de la Seine-Maritime, et de plus, la répartition mensuelle des pluies est très voisine savoir : très forte en octobre, novembre, décembre soit 80 à 90 mm. Encore forte en janvier soit près de 70 mm, faibles de février à juin entre 50 et 60 mm et un peu plus forte en juillet-août-septembre avec 60 à 70 mm.

En haute-Normandie, la durée d'insolation est de 1 800 heures par an, avec des mois plus ensoleillés de mai à août où l'on note en général plus de 200 heures.

En février l'ensoleillement est inférieur à 100 heures, et tombe à 50 heures en décembre.

La nébulosité, côtée de 0 à 10, avec 0 pour le ciel pur, 5 pour le ciel demi-couvert et 7 pour le ciel 3/4 couvert, se révèle élevée et supérieure à 7 d'octobre à février et même avril. Elle oscille autour de 6,5 de juin à septembre.

Voyons maintenant quelles sont les particularités de la vallée de Seine par rapport à ces indications générales.

Pour essayer de les mettre en évidence, nous avons d'abord recherché dans les documents rassemblés par SANSON, tous les résultats relatifs aux postes situés dans la vallée ou à proximité immédiate de la Seine, pour l'Eure et la Seine-Maritime.

Nous avons ensuite présenté ces résultats par distance croissante de la mer, à vol d'oiseau, à partir du Havre. Ces distances sont indiquées, ainsi que l'altitude des pluviomètres.

Un graphique construit sur ces données montre d'abord une décroissance du nombre de jours de pluie et de la quantité tombée au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la côte.

TABLEAU A

Pluies de la Vallée de Seine — Période 1891-1930

Poste	Distance en km.	Altit. en m	Pluies en m/m												
			J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Le Havre	0,0	29	68	60	64	61	62	61	64	69	58	84	97	91	839
Lillebonne	33,5	39	81	63	59	74	62	63	61	80	75	97	74	119	908
Pont-Audemer	34,0	8	58	47	55	53	52	53	67	64	57	82	74	81	743
Villequiers	43,5	9	62	46	50	56	50	52	64	60	47	68	69	77	701
Caudebec.....	47,5	9	64	48	54	56	50	60	73	60	62	74	75	85	761
Rouen	75,0	11	59	49	52	51	50	53	65	54	52	71	68	77	701
St. E. du Vauvray.	88,0	12	45	37	45	42	44	50	63	48	47	66	55	68	610

TABLEAU B

Jours de pluie — (Pluies d'au moins 0,1 *mm) —*

Poste	Distance en km.	Altit. en m.	Pluies en m/m												
			J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Le Havre	0,0	29	21	15	16	16	15	11	13	12	15	17	19	19	189
Pont-Audemer	34,0	8	15	12	12	15	13	10	12	14	12	14	15	16	160
Rouen	75,0	11	20	13	13	15	14	10	12	14	13	15	17	20	176

Elle montre ensuite les particularités de certains postes, tel celui de Lillebonne, qui a toujours des chiffres très élevés, alors que Pont-Audemer, situé à la même distance de la mer, puisque dans la vallée adjacente de la Risle se classe généralement en retrait du Havre.

De même entre Villequiers et Caudebec, proches l'un de l'autre, c'est Caudebec le plus distant de la mer qui est le plus arrosé. Il faut alors tenir compte de ce que Villequier est abrité de l'ouest par la falaise morte, tandis que Caudebec, au sommet de la boucle de la Seine, est plus ouvert aux vents dominants.

Bref, le micro-climat dans lequel est inséré le poste joue un rôle prépondérant. En réalité, aucune statistique ne devrait être utilisée sans que soient minutieusement spécifiées les conditions locales de micro-climat. Nous sommes malheureusement très loin de ces conditions.

Si l'on compare la pluie reçue dans la vallée de Seine à la pluie pour tout le département, on constate que les localités de la vallée voisine de la côte sont plus arrosées et celles de l'intérieur moins arrosées.

Mais par rapport à certaines stations élevées, comme Buchy, à près de 200 m avec 946 mm par an, on voit que l'altitude peut compenser largement la proximité de la mer.

Dans une étude très complète sur la végétation des falaises calcaires de la Basse-Seine (8) J. LIGER a été amené à rechercher l'influence du climat et du micro-climat.

Il a publié le tableau ci-après de la hauteur normale des pluies en m/m par mois pour différentes localités de la vallée.

TABLEAU A *bis*

Pluies de la vallée de Seine — d'après J. LIGER

Postes	Distances	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Le Havre	0,0	73	48	57	53	64	66	64	70	85	102	87	77	846
Honfleur	12,5	67	44	51	49	58	64	70	67	71	84	78	71	774
Fatouville	19,0	68	46	55	50	60	44	71	65	76	87	77	73	792
Pont-Audemer	34,0	57	42	43	48	52	59	65	63	63	73	68	65	704
Villequiers	43,5	75	56	59	49	59	61	72	72	78	100	87	90	858
Caudebec	47,5	75	59	61	52	61	63	80	78	76	102	88	96	891
Elbeuf	72,0	49	36	41	42	50	55	59	53	54	62	58	54	613
Rouen	75,0	56	52	49	45	56	61	65	64	62	70	61	64	695
Poses	88,0	48	36	42	42	50	57	58	58	54	62	54	54	615

Les différences avec le tableau A, quand il s'agit des mêmes postes, tient à la différences des années de référence.

Par ailleurs, on retrouve la continentalisation des postes de l'intérieur, et les divergences dues aux micro-climats.

Voici à titre de complément, l'intensité des pluies au Havre, pour la période considérée.

TABLEAU C

Pluies par intensité au Havre

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Moins de 1 mm	6	5	6	5	5	4	5	5	5	5	5	5	61
De 1 mm. à 10 mm	13	9	9	9	8	6	7	5	8	10	12	11	107
Plus de 10 mm,	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	3	21

Plus forte chute d'eau de 1929 à 1938 = 49,8 le 4 Août 1938.
2 chutes supérieures à 40 mm. 24 h. en 10 ans.

Parmi les indications sur le nombre de jours de brouillard, nous avons trouvé 4 stations en Vallée de Seine.

TABLEAU D

Jours de brouillard

Localités	Distances à la mer	J	F	M	A	M	J	J	A	S	G	N	D	Année
Le Havre	0,0	8	6	6	4	3	3	3	3	3	3	6	7	54
Rouen	75,0	12	12	8	4	4	4	3	4	5	7	12	12	87
Pt. de l'Arche	81,5	5	3	3	3	3	2	1	5	6	6	7	6	50
Vernon	113,0	5	3	3	2	2	1	1	4	4	5	8	6	44

Le Havre, balayé par les vents du large, est moins enclin au brouillard que Rouen, dont l'agglomération est chargée de fumées d'usines. Vernon, loin de la mer et peu industrialisée autrefois, présente le plus faible pourcentage.

Remarquons que dans le micro-climat doit entrer en ligne de compte l'activité industrielle. Les fumées peuvent modifier grandement les jours de pluie, de brouillard, l'ensoleillement, etc... En réalité, les résultats météorologiques utilisables pour l'agriculture devrait toujours provenir de postes situés en pleine campagne.

L'article de SANSON donne moins d'indications pour les températures que pour les pluies. Nous ne pouvons comparer que Rouen et le Havre.

TABLEAU E

Températures de la vallée de Seine

Station	Altitude	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Le Havre	17	4,9	5,6	7,4	10,3	13,8	16,3	18,2	18,1	16,1	12,3	7,9	6,0	11,4
Rouen	11	4,1	4,7	7,0	9,8	13,6	16,5	18,3	18,1	15,6	11,1	6,6	4,8	10,9

Nous y ajouterons le nombre de jours de gelée au Havre, ainsi que les minima absolus.

TABLEAU F

Jours de gelée au Havre

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Moyens	5	5	3	0						0	2	7	22
Maxima	16	14	1	2						2	0	18	62
Minimum annuel													9
	Minima absolus de température au Hâvre												
Degrés au dessus de zéro	12	11	5	2						1	4	12	

Dans l'étude de J. LIGER, déjà citée (8) nous trouvons un tableau des températures mensuelles de 1901 à 1913 — Nous en extrayons ce qui suit :

TABLEAU E *bis*

Températures de la vallée de Seine — d'après J. LIGER

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Le Hâvre	4,7	5,2	7,5	10,0	13,6	16,0	18,1	18,0	15,8	12,4	7,8	5,8	11,24
Villequier	3,4	4,3	7,2	10,6	15,4	18,4	20,5	19,4	15,9	11,5	6,5	4,6	11,47
Rouen	3,6	4,1	6,5	9,6	13,6	16,2	18,3	17,6	14,9	11,2	6,5	4,6	10,56
St-Aubin-les-Elbeuf	2,4	2,7	5,3	8,5	13,1	15,4	18,0	17,4	13,6	9,8	5,1	3,6	9,57

L'estuaire est nettement plus chaud en hiver, mais le reste encore légèrement en été. Nous retrouvons la situation privélégiée de Villequier. Entre Rouen et Saint-Aubin les Elbeuf, situés à peu près à même distance de la mer à vol d'oiseau, il y a 1° d'écart annuel en faveur de Rouen, mais le poste de Rouen, qui n'existe plus, était dans une île de la Seine.

SOLS ET SOUS-SOLS

Pour étudier finement les divers sols susceptibles d'exister dans la boucle de Duclair, nous avons déjà indiqué que nous avons tracé deux perpendiculaires au fleuve la première en face de Duclair jusqu'au plateau de Bardouville, l'autre sur la commune d'Anneville s/ Seine, à partir du lieudit le « Rouage ».

Un tableau détaillé des analyses granulométriques de la traversée I a déjà été publié dans la Revue des Sociétés Savantes de Haute-Normandie (7) et nous n'en rappellerons ici que l'enssetiel.

Par contre, les profils de la traversée II sont donnés dans le tableau A page 685.

Dans ce tableau les échantillons sont désignés par un chiffre caractérisant la tournée, une lettre majuscule caractérisant l'emplacement du profil et une lettre minuscule caractérisant la couche analysée. Les lettres majuscules manquantes correspondent à des profils examinés sans prélèvements.

Vient ensuite la distance à la Seine, les coordonnées Lambert et l'altitude du sol N. G. F. La colonne suivante indique la profondeur moyenne de chaque couche (qui ne correspondent pas dans ces sols jeunes ou très filtrants à des horizons définis). La sonde (Hélix, diam. 8 cm) a été poussée aussi loin que possible, soit près de 130 cm dans les sols d'alluvions modernes, mais beaucoup moins dans les sols sablo-caillouteux. Pour ces derniers, de petites carrières d'exploitation de sables et cailloux assez fréquentes ont permis de se rendre compte de l'aspect du sous-sol profond.

Les colonnes suivantes contiennent successivement la proportion de cailloux, la teneur en carbonate de Chaux, en humus, en argile, en sables silicieux et enfin le spectre silicieux représenté par un index « lettré » que nous avons utilisé dans de précédentes publications, dont nous donnons à nouveau la clef ci-dessous :

Le total des sables silicieux entre 0,02 et 2 mm est posé égal à 100 p. 100. Ce total est divisé en 6 classes, dont les limites sont : 0,02 — 0,05 — 0,1 — 0,2 — 0,5 — 1 — 2 mm —Chaque classe des sables d'un échantillon donné représente un pourcentage défini du total des sables, et ce pourcentage est indiqué par une lettre couvrant 5 unités, sauf au début où il a

été reconnu nécessaire d'avoir les intervalles plus petits. On a la correspondance ci-après :

0 — 1 — 3 — 5 — 7 — 10 — 15 — 20 — — — — — — — — — — — — 90 — 95 — 100
x — a — b — c — d — e — f — g — — — — — — — — — — — — u — v — w

Exemple : la couche 5AC ayant la composition sableuse centésimale ci-après :

Composition.....	68,0	29,0	0,9	1,7	0,4	0,0
sera notée.....	q	i	a /	b	a	x

Groupes : sables fins silicieux / sables grossiers silicieux.

Cet index lettré permet une comparaison rapide et suffisamment précise des compositions sableuses fixes, alors que l'examen de la masse des nombres de 3 chiffres, obtenus par les analyses, serait difficile et fastidieux. Il se prête éventuellement à la confection des graphiques.

Les teneurs en Carbonate de Chaux ont été obtenues par dosage au calcimètre, avec témoin de calcite dans chaque série.

Le pH a été déterminé, à l'électrode de verre. Dans le cas des terres calcaires on sait que la teneur en CO_2 de l'atmosphère en équilibre avec la suspension joue un rôle important dans la détermination du pH. Nous donnons donc quelques indications sur le mode opératoire que nous avons toujours suivi depuis une douzaine d'années.

On pèse 20 g de terre dans un tube en pyrex de 75 ml (volume total). On ajoute 20 ml d'eau distillée (permutée) bouillie soit un rapport 1/1. On bouche — il reste environ 1/3 de volume libre. On agite 1/2 h par retournement à 40 t/m. On passe chaque suspension au pH mètre dans sa presque intégralité et la mesure est rapide. Dans ces conditions, les chiffres obtenus sont reproductibles et comparatifs.

Les teneurs en « humus « portées dans le tableau sont plus exactement les matières organiques totales par calcination, déduction faite de l'eau de l'argile et du CO_2 des carbonates.

Ces valeurs ont été comparées dans la majorité des cas avec les teneurs en azote total par Kjeldahl et les teneurs en carbone par la méthode ANNE. Le dosage de l'azote est bien reproductible. Le dosage du carbone l'est un peu moins, surtout pour les terres sableuses très pauvres ou les terres tourbeuses très riches.

Les teneurs en argile ont été obtenues par la méthode pipette classique pour les terres sableuses, et par la méthode Demolon au Citrate de soude pour les terres calcaires.

Les sables ont été obtenus par tamisages vibratoires sous courant d'eau à travers des toiles en acier inoxydable. Les résidus ont été contrôlés de temps en temps au microscope binoculaire.

Les graphiques 1 et 2 montrent les compositions sableuses en fonction des profondeurs dans chaque profil, des distances à la Seine sur les traversées I ou II, et des altitudes.

TABLEAU A

Echant.	Distance à la Seine & coordonnées Lambert x/y/z	Profondeur moy. cm	Cailloux % de terre brute	% de terre fine				Spectre des sables siliceux 20/200 - 0,2/2 µ mm
				CO_3Ca	Humus	Argile	Sables siliceux	
5 Aa...	Seine à 190 m	7,5	0,0	21,4	9,2	16,0	45,4	rha - bax
b...		22,5	0,0	24,7	6,1	16,2	45,6	vbb - cba
c ..	493,300	40,0	0,0	28,0	3,1	15,3	46,9	qia - bax
d...	194,000	62,5	0,0	29,7	2,1	15,1	45,1	mna - axx
e...	± 3,90	87,0	0,0	30,5	2,1	13,0	44,0	wba - aax
f...		102,0	0,0	32,1	2,0	12,7	45,8	ria - aaa
g ..		118,5	0,0	31,8	1,5	10,1	48,5	waa - aaa
5 Ba...	Seine à 390 m	11,0	0,0	25,7	4,3	16,3	44,5	vbb - baa
b...		28,5	0,0	27,5	2,6	17,8	45,2	waa - baa
c ..	493,400	43,0	0,0	28,5	2,5	17,4	42,5	wba - aaa
d...	194,020	60,5	0,0	29,4	1,6	20,0	41,5	wba - aaa
e...	± 3,90	79,5	0,0	30,1	2,6	12,4	45,4	wba - aaa
f...		96,0	0,0	30,8	2,4	16,2	42,0	waa - aaa
g...		117,0	0,0	31,6	2,9	11,5	46,9	waa - aaa
5 Ca...	Seine à 480 m	7,5	0,0	14,5	15,0	33,3	23,6	qce - gca
b...		22,5	0,0	21,6	7,4	34,1	22,0	rce - fcb
c...	493,580	43,5	0,0	29,3	3,9	32,4	22,8	ubb - cbb
d...	194,050	65,0	0,0	31,6	2,7	24,1	32,2	waa - aax
e...	±3,75	89,0	0,0	33,2	1,8	24,6	28,8	wba - aax
f...		109,5						
g...	tourbe	123,0	0,0	10,0	22,4	24,9	27,9	vdb - bax
5 Da...	Seine à 650 m	7,5	0,0	16,0	13,7	29,2	26,0	scc - ecb
b...		24,5	0,0	23,1	5,0	35,4	22,4	scc - ecb
c ..	493,750	35,5	0,0	24,4	3,3	34,0	20,6	vcb - bax
d...	194,040	51,0	0,0	24,8	3,6	36,7	21,7	waa - xaa
e ..	± 3,50	71,5	0,0	27,8	2,2	32,7	23,8	wba - axa
f ..		96,0						
5 Fa ..	Seine à 860 m	9,0	0,0	31,5	16,9	37,3	17,2	scd - ebb
b ..	493,960	29,0	0,0	12	10,4	41,2	15,5	sed - eba
c ..	194,040	49,5	0,0					
d ..	± 3,50	68,5	0,0	0,3				
6 Aa...	Seine à 960 m	7,0	0,0	8,2	39,0	14,7	14,1	qbf - ebx
b ..	494,050	27'5	0,0	14,5	14,6	45,1	15,6	ojc - cba
c ..	194,060	56,0	0,0	0,6	48,0	24,6	21,1	ucb - bex
d ..	± 2,50	125,0						
6 Ba ..	Seine à 1260 m	7,0	0,0	0,0	9,2	11,4	71,8	gci - mcx
b ..	494,320	20,0	6,5	0,0	4,4	11,4	79,6	fci - meb
c ..	194,300							
	± 3,75	30,5	40,4	0,0	0,1	0,7	96,7	ech - mec
6 Ca ..	Seine à 1190 m	7,5	0,0	0,0	18,0	32.4	42,4	lah - ica
b ..		17,5	0,4	0,0	10,0	28,4	48,7	idi - jbb
c ..	494,250	27,5	17,8	0,0	2,9	3,5	88,1	edi - mec
d ..	194,300	42,0	13,1	0,0	0,1		98,4	fdi - bec
e ..	± 3,25	57,5						
f ..		70,0						
6 Ea ..	Seine à 1360 m	10,0	11,7	0,0	2,5		93,8	fch - mfc
b ..	494,420	26,0	16,9	0,0	1,6	1,5	92,7	fcg - mfd
c ..	194,300	37,0	40,6	0,7	1,4		92,6	ecg - mfd
d ..	± 5,50	47,0	57,9	0,0	1,0		97,3	fcg - nfd
	Seine à 1500 m							
6 Fa ..	494,550	10,0	16,8	0,0	3,1	5,0	89,5	gcg - neb
b ..	194,360	26,0	28,7	0,0	2,4	2,4	88,4	fcf - efd
	± 7,0							

TABLEAU A *(suite)*

Échant.	Distance à la Seine et coordonnées Lambert x/y/z	Profondeur moy. cm	Cailloux % de terre brute	% de terre fine				Spectre des sables siliceux 20/200 - 0,2/2 μ mm
				CO_3Ca	Humus	Argile	Sables siliceux	
6 Ha ..	Seine à 1840 m	10,0	4,8	0,0	2,6	1,0	92,2	e c g - n f x
b ..		27,5	4,3	0,0	0,9	2,0	93,1	d b g - n h c
c ..	494,900	40,0	8,4	0,0	0,9	2,7	96,4	d b g - n g b
d ..	194,900	49,0	8,6	0,0	0,9	1,7	95,2	d b f - n h c
e ..	± 5,50	68,0						
f ..		79,0	25,4	0,0	0,6	1,7	94,2	c c h - e f b
6 Ia...	Seine à 2040 m	10,0	8,0	0,0	1,7	1,7	93,1	d c g - o f b
b...	495,100	25,5	18,6	0,0	1,1		95,2	c b h - k h e
c...	194,440 ± 5 m	38,0	16,9	0,0	0,9		96,4	c b h - l i e

Voici les interprétations que suggèrent les graphiques et les analyses correspondantes.

La première traversée montre nettement 2 parties, séparées par une zône de transition.

Première partie

La première partie comprend la banquette d'alluvions modernes argilo-calcaire humifère, d'altitude + 4 m N. G. F. allant de la Seine au début des prairies du marais soit, en cet endroit, environ 380 m.

Les sols de cette banquette ont une texture sablo-silicieuse très homogène, caractérisée par un très grand pourcentage de sables très fins : 20 à 50 μ, très peu de sables fins : 50 à 100 et presque pas de sables d'autres catégories.

La lettre d'index pour la catégorie 20 — 50 μ oscille entre *w* et *u* c'est-à-dire de 85 à près de 100 p. 100, et cela sur toute la hauteur du profil, laquelle atteint 1,30 m dans ce sol sans cailloux.

En conséquence, les pourcentages de la catégorie 50-100 μ sont toujours inférieurs à 15 p. 100 et ne dépassent guère 5 à 7 p. 100. Les autres catégories sont presque toujours inférieures à 3 p. 100 et souvent nulles pour le sable de 1 à 2 mm.

On remarque que l'alluvion est particulièrement fine dans la partie la plus éloignée de la Seine (1 C) où dès 20 cm de profondeur, plus de 95 p. 100 du sable silicieux est inférieur à 50 μ.

Bien entendu, les cailloux, ou plutôt les graviers sont extrêmement rares, et résultent certainement d'un apport fortuit, soit par des causes naturelles : bois ou herbes flottées, glace, soit éventuellement par l'homme, notamment s'il s'agit des couches superficielles.

Ils se résument en quelques fragments de silex (blancs, ocres, noirs...) en quelques grains de craie et en quelques débris de petits coquillages.

Le sable grossier siliceux contient peu de grains de quartz (roulés) et quelques éclats de silex. Le sable fin siliceux est presque uniquement formé d'éclats de quartz non roulés.

Le sable grossier calcaire est en majorité constitué par des débris de coquillages, ainsi que le sable fin, pour sa partie reconnaissable au binoculaire.

L'étude comparée des différentes fractions calcaires est intéressante.

Tout d'abord, on constate que la quantité de sables grossiers calcaires 0,2 à 2 mm est très faible, de l'ordre de 1 p. 100 de la terre fine soit environ 3 p. 100 du calcaire total, et sensiblement constante dans le profil.

La quantité de sables fins calcaires : 0,02 à 0,2 mm est plus élevée, pratiquement constante dans le profil au dessous de 40 cm — de l'ordre de 16 à 20 p. 100 de la terre fine soit environ les 2/3 du calcaire total.

Le reste est du calcaire très fin, des particules inférieures à 20 μ, à peu près constant au dessous de la couche superficielle, il est de l'ordre de 10 à 14 p. 100 de la terre fine soit environ 1/3 du calcaire total.

La teneur en calcaire total est moins forte dans les couches superficielles. Cela s'explique par une assez grande quantité de matière organique, car le sol est enherbé depuis toujours. Cette teneur est de 6,1 p. 100 entre 0 et 15 cm pour le profil 1A — 4, 1p. 100 pour le profil 1B et 10,0 p. 100 pour le profil 1C. Nous en reparlerons.

Il faut également tenir compte de la variation d'argile, laquelle, assez faible pour 1A et 1B où les teneurs dans les profils s'éloignent peu de 12 à 13 p. 100 ; devient plus importante en 1C où elle passe d'environ 25 p. 100 en surface à 20 p. 100 en profondeur.

Pour essayer de caractériser la variation des teneurs en calcaire dans chaque profil, nous avons admis qu'à l'origine du dépôt, il y avait un rapport à peu près constant entre les teneurs en sables siliceux et en sables calcaires.

De plus, comme les teneurs absolues en sables grossiers sont faibles, et par là sujettes à des variations relatives assez fortes et aléatoires, nous n'avons calculé les rapports ; sables calcaires / sables siliceux ; que dans la catégorie ; sables fins, de 0,02 à 0,2 mm.

Le tableau B donne les résultats pour les banquettes d'alluvions modernes dans les traversées I et II. Nous y avons joint 2 profils de Saint-Maurice d'Ételan, très en aval, et le rapport trouvé dans une couche d'alluvions tout récemment déposée à Bardouville, pendant l'hiver 1957/1958.

On peut voir qu'à une certaine profondeur, environ 40 cm, le rapport sables calcaires fins / sables fins siliceux est voisin de 30 p. 100 dans les alluvions vieilles vraisemblablement de 17 siècles (I et II), et aussi dans des alluvions datant de moins de 100 ans, à Saint-Maurice d'Ételan. Quant aux alluvions déposées l'hiver dernier, le rapport est plus élevé, voisin de 34 p. 100.

On constate également que, malgré des fluctuations d'un profil à l'autre, les couches superficielles sont nettement décalcifiées dans les alluvions les plus anciennes. D'après le profil 1 A, la moitié du calcaire de surface aurait disparu et d'après le profil 1 C, environ les 2/3.

TABLEAU B

Pourcentage sables calcaires fins / sables fins totaux couches par profondeur croissante

Profils	a	b	c	d	e	f	g
I							
1 A	14,0	14,6	27,8	28,2	29,4	30,8	29,1
1 B	26,3	25,8	29,0	25,9	25,7	25,6	31,2
1 C	20,5	22,4	30,7	30,9	30,7	27,9	
II							
5 A	18,8	21,0	24,5	26,2	26,3	26,1	14,3
5 B	23,9	27,9	26,9	30,2	28,7	29,9	28,8
5 C	24,5	26,3	32,7	31,7	33,2	8,9	
5 D	21,6	31,3	39,6	23,5	30,4		
St. Maurice d'Etelan							
4 B	26,8	24,6	32,5	30,8	26,2	28,9	29,8
4 C	30,0	28,0	29,6	27,5	29,0	29,1	28,8

Au contraire, les alluvions récentes de Saint-Maurice d'Ételan, dues aux endiguements de la Basse-Seine réalisés ici en 1848/49, montrent en 4 C un profil homogène avec un lessivage nul, alors que le 4 B, plus proche de la digue, a dû être perturbé par des déversements de dragage.

En résumé, si nos hypothèses sont justes, un sol d'alluvions modernes de la Vallée de Seine à 30 p. 100 de calcaire total à l'origine dont environ 20 p. 100 de sables fins 0,02 à 0,2 mm, peut perdre en surface, par lessivage climatique, de 40 à 60 p. 100 de son calcaire sableux fin en 17 siècles (1) soit environ 3 p. 100 par siècle.

La perte de calcaire très fin (limon et argile) doit être plus rapide ; mais elle est difficile à évaluer en l'absence de point de repère utilisable.

Il semble que la richesse des différentes couches en argile soit presque constante en un point donné. Les colloïdes argileux, très coagulés, n'ont guère migré. Il semble même que les couches superficielles soient un peu plus argileuses que les couches profondes, ce qui proviendrait d'un dépôt un peu plus vaseux dans les derniers temps, quand la digue naturelle longeant le fleuve a presque atteint sa hauteur maximum.

Le cas est particulièrement net pour le profil 1 C où la surface est à

(1) Si $a + b$ est le poids de sables fins silicieux et calcaire à l'origine ; $a + b'$ le poids après n siècles, avec $c = b/(a + b)$, $c' = b'/(a + b')$ et $b\text{-}b' = \Delta b$ on a $\Delta b/b = \dfrac{c - c'}{c\,(1 - c')}$. Pour $c = 0{,}3$ et $c' = 0{,}15$ $\dfrac{\Delta b}{b} = 0{,}588$; pour $c' = 0{,}2$ $\dfrac{\Delta b}{b} = 0{,}416$.

24,8 p. 100 de la terre fine malgré une teneur élevée en humus (10 p. 100), alors que l'on a environ 20 p. 100 en profondeur. Le profil 1 A donne 12 à 13 p. 100 d'argile et 1 B 11 à 14 p. 100.

Les teneurs en limon 2 à 20 μ sont de l'ordre 5 à 10 p. 100 pour la partie siliceuse et environ autant pour la partie calcaire.

Les teneurs en humus de la banquette argilo-calcaire sont fortes, par suite d'un enherbement continu depuis sans doute l'origine du dépôt. Signalons toutefois que quelques champs de cette zone sont labourés régulièrement. C'est le cas pour celui d'où a été tiré le profil 1 B. On trouve alors nettement moins d'humus que dans les prairies voisines, et d'autre part, les répartitions de calcaire et d'argile sont perturbées en surface.

Le profil 1 A donne 6,1 p. 100 en surface, 3,1 à 20 cm., 2,4 à 40 cm et environ 2 p. 100 à 1 m.

Le profil 1 B donne 4 p. 100 dans les 30 premiers centimètres et 2 p. 100 en profondeur.

Le profil 1 C est nettement plus humifère parce que sans doute moins drainé. Il donne 10 p. 100 en surface — 5 à 6 p. 100 à 20 cm — et 2 p. 100 en profondeur.

Zone de transition de la traversée I
Prairie d'alluvions argilo-calcaires sur tourbes

Dans la prairie, très légèrement plus basse que les précédentes, dans laquelle nous avons exécuté le profil 2 A, nous trouvons de la tourbe dans le sous-sol. Les alluvions qui la recouvrent sont devenues très argileuses et absolument imperméables.

On trouve 28 p. 100 d'argile en surface, 41 p. 100 dans le sous-sol immédiat jusqu'à 60 cm, puis un mélange d'alluvions et de tourbe, et enfin de la tourbe franche au-dessous de 80 cm.

L'épaisseur des alluvions est d'autant plus faible que l'on s'éloigne de la Seine : à 580 m la tourbe est rencontrée à 90 cm, à 840 m elle n'est plus qu'à 50 cm, surmontée de quelques graviers qui font présager la proximité des alluvions anciennes.

Les sables siliceux du limon très argileux qui surmontent la tourbe sont toujours très fins, sans avoir l'extrême finesse de ceux du profil 1 C. On note par exemple, tec/cax à la profondeur moyenne de 26 cm.

Les sables de la tourbe sont encore un peu moins fins, par exemple, pgf/cba à la profondeur moyenne de 94 cm.

Corrélativement à l'augmentation de l'argile et de la matière organique, on assiste à l'effacement du calcaire ; environ 13 p. 100 en surface, 22 à 26 p. 100 dans le proche sous-sol, 18 p. 100 au passage de la tourbe, et seulement 2,5 p. 100 dans la tourbe caractérisée.

Quand on fore un trou de sonde dans ces prairies, il est d'abord sec

puis quand on arrive à la tourbe, l'eau apparaît et monte rapidement, en quelques minutes, jusqu'au niveau de l'eau du fossé longeant le chemin.

Réciproquement, dans les parties de prairies en contre-bas non drainées superficiellement par des fossés, l'eau de pluie ou éventuellement de crue, séjourne indéfiniment, et ne disparaît que sous l'action du soleil dans les étés secs. Ces dépressions présentent naturellement un aspect un peu marécageux, et l'herbe y est remplacée par des carex.

Prairie communale

Dans le forage 2 B, à 900 m de la Seine, nous assistons au passage des alluvions modernes aux alluvions anciennes.

On trouve du calcaire jusqu'à 40 cm environ, mais seulement pour 3,7 p. 100 de la terre fine. A cette même profondeur, l'argile qui était de 27 p. 100 en surface, n'est plus que de 6,8 p. 100 et baisse brusquement à 2 p. 100 vers 50 cm. L'humus dosé à 17,7 p. 100 en surface n'est que de 1,9 à 40 cm et 0,6 à 50 cm. Enfin les cailloux passent de 0 en surface à 12,7 p. 100 à 50 cm.

L'index lettré suit ces changements. Les sables siliceux encore à dominante de sables fins jusqu'à 40 cm : on note mcf/idb à 24 cm de profondeur moyenne, passent rapidement à une dominance de sables grossiers au-dessous. On note, par exemple, dei/meb à 94 cm de profondeur moyenne.

La prairie communale est vraiment une zone de transition, d'ailleurs irrégulière et difficile à bien exploiter.

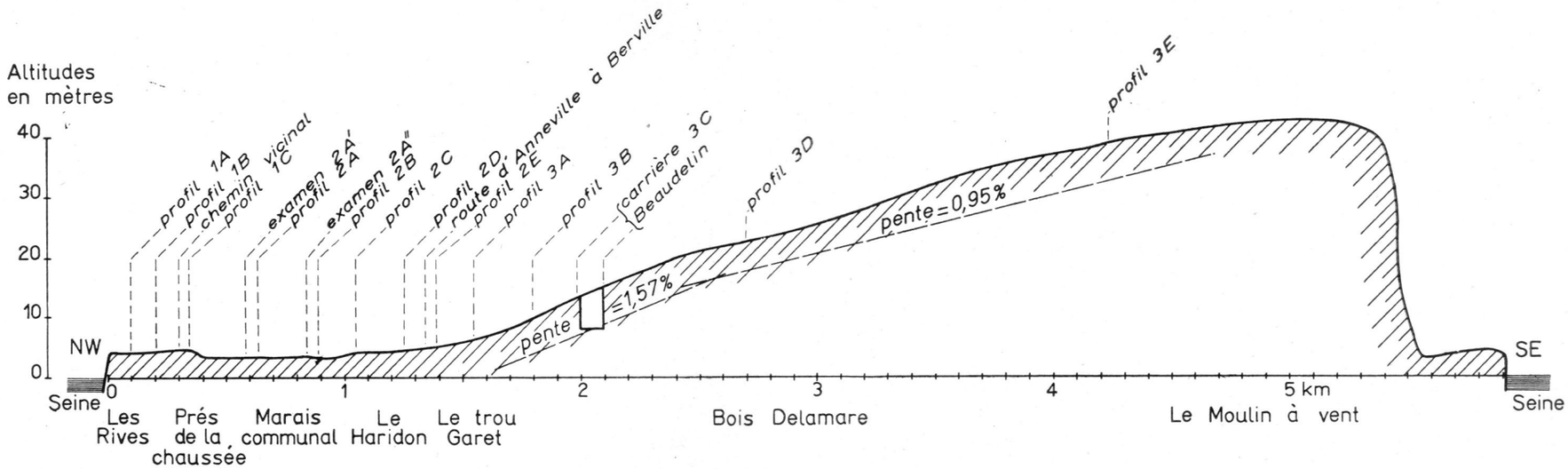
Zone des alluvions anciennes labourées

Dès que les alluvions anciennes affleurent, les prairies permanentes disparaissent, l'altitude augmente peu à peu, quoique très légèrement (pente inférieure à 1 p. 100 pendant 600 mètres). On est dans la zone des labours, jusqu'à environ 2 km du fleuve, où les labours cèdent la place aux arbres des maigres forêts des « hauts ».

Profil 2 C, 1 km 040 du fleuve, ce labour très caillouteux : 20 p. 100 de la terre brute en surface et 50 p. 100 en profondeur, présente des sables siliceux riches en parties grossières A 50 cm, l'index est ebe/hkk.

Il n'y a aucune trace de calcaire. L'argile est très faible dans tout le profil, elle varie de 4 à 6 p. 100 de la terre fine. L'humus est également très faible : environ 1,5 à 2 p. 100 en surface et entre 0,5 et 1 dans le sous-sol.

Profil 2 D, à 1 km 250 du fleuve, est encore plus pauvre en argile, laquelle ne dépasse pas 5,3 p. 100.



	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3D	3E
0,0	vbb_baa wba_aaa vca_aax	ueb_caa tfb_baa vda_aba	vbb_baa vaa_baa wba_baa waa_aaa	ucb_cba tec_cax rfe_ccx	mde_jbb mcf_idb gch_meb aei_oda	ecf_kib fcf_ngb ebf_nhd efc-lie	ecf-nfc fbe-pfc fcf_ofc fdg-mfc	fdf-lic ecg-nfc dce_ofe	edg-nfc ebf_mic fef_ngd	fch-mfb edg_oeb fcf_oec	ebh_nfb def_pgc gce_odc	fcf_ofa ecg_ofb dcf_pfc
0,50	vda_aaa wca_aax vca_aaa	ufa_aaa wba_aaa vca_aaa	waa_baa wba_aaa	sec_cbb pgf_cba	dci_nda dci_oeb dci_meb	gbe-hkf ebe_hkk	ech_mfc fbh_ngc	dbe_mif ebg_mff	ede-ofc ebf_nge	ecg_nee edh_ned edg_ned		fcf_ofb
1m	wba_aaa	vea_bax										
1,50												

Traversée I. — Berville – Bardouville.

Profil 2 E, à 1 km 400 et 5 m N. G. F. voit le maximum de l'argile descendre à 3,8 p. 100. La matière organique n'est que de 1,8 p. 100 en surface. Les cailloux atteignent 30 p. 100 à 71 cm et les sables siliceux constituent alors près de 94 p. 100 de la terre fine.

Ces sols sont cependant cultivés, mais avec des faibles rendements que nous expliciterons dans la partie consacrée aux cultures.

On pourra trouver dans le tableau de la revue des Sociétés Savantes déjà citée (7), le détail des analyses physiques et granulométriques des autres profils en sols sablo-caillouteux de la traversée I.

La composition granulométrique des alluvions anciennes ne diffère sensiblement du haut en bas de la pente et le long des premiers décimètres des profils.

Les proportions de sables les plus fréquentes sont indiquées par l'index ecf-nfc, c'est-à-dire 7 à 10 p. 100 des sables entre 20 et 50 ; 3 à 5 p. 100 entre 50 et 190 ; 10 à 15 p. 100 entre 100 et 200, puis 50 à 55 p. 100 entre 0,2 et 0,5 mm ; 10 à 15 p. 100 entre 0,5 et 1 mm et 3 à 5 p. 100 entre 1 et 2 mm.

On rencontre fréquemment le groupe fcf dans les sables fins et ncf dans les sables grossiers.

La teneur en humus est toujours très basse en surface (entre 1,5 et 2 p. 100) et encore plus faible à quelques décimètres de profondeur (0,5 p. 100). En forêt cependant, la couche superficielle n'étant pas remuée peut monter à 2,5 p. 100 ,avec 1 p. 100 à 40 cm.

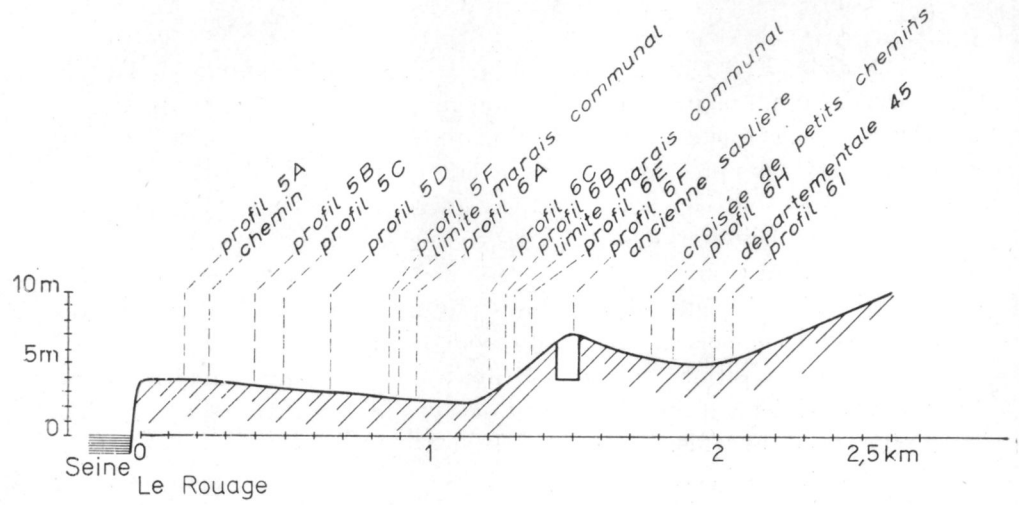
La teneur en argile est très faible et varie peu dans le profil. Au-dessous des bois, on note une tendance des parties superficielles des champs labourés à être légèrement plus argileuses que le sous-sol. Dans le dernier profil, au-dessus des bois, on note au contraire une répartition plus normale, avec 1,5 p. 100 en surface et 3 p. 100 vers 60 cm. Peut-être y a-t-il là le résultat d'un lessivage beaucoup plus prolongé (distance du fleuve = 4,240 km contre 1,800 km avant le bois) on note à l'appui une extrême pauvreté en argile.

Acidité des sols

Le pH des alluvions modernes argilo-calcaires est naturellement supérieur à 7. Par la méthode de la Station Agronomique de Rouen : 20 g de sol dans un tube pyrex + 20 g d'eau distillée bouillie + 1/2 h agitation rotative + électrode de verre dans la suspension, nous avons des pH sensiblement constants dans les 3 premiers profils, 7,2 à 7,3 en surface et 7,5 à 7,6 en profondeur.

Dans le profil 2 A sur tourbe en profondeur, le pH baisse à partir de 50 cm en passant par 7,0 entre 0,90 et 1 m pour aboutir à 6,4 dans la tourbe à 1,20 m.

Dans le profil 2 B, passage des alluvions modernes aux alluvions



	5A	5B	5C	5D	5F	6A
0	rha_bax vbb_cba qia_bax	vbb_baa waa_baa wba_aaa	qce_gea rce_fcb ubb_cbb	scc_ecb scc_ecb vcb_bax waa_xaa	scd_ebb sed_eba	qbf_ebx ojc_cba ucb_bex
0m,50	**nma-axx** wba_aax	wba_aaa wba_aaa	**wba-aax** **waa-aax**	wba_axa		
1m	ria_aaa waa_aaa	waa_aaa waa_aaa	vdb_bax			
1m,30						

	6C	6B	6E	6F	6H	6I
0	lah_ica idi_jbb edi_mec fdi_bec	gci_mcx fci_meb ech_mec	fch_mfc fcg_mfd ecg_mfd fcg_nfd	gcg_neb fcf_ofd	ecg_nfx dbg_nhc dbg_ngb dbf_nhc	dcg_ofb cbh_khe cbh_lie
0m,50					cch_ofb	
1m						
1m,50						

Traversée II. — Anneville – Bardouville.

anciennes la surface est 6,9 (très humifère) mais se maintient entre 7,4 et 7,5 dans tout le sous-sol.

Dès le profil 2 C, une acidité très nette s'établit. En général, la surface présente un pH entre 4 et 5. Le pH monte lentement quand on descend dans le sous-sol, pour se situer entre 5 et 6 dans la zone de 60 à 80 cm.

La terre du bois 3 D montre un pH uniforme de 4 jusqu'à 60 cm et le pH du champ après bois 3 E reste toujours au-dessous de 5 jusqu'à 80 cm.

Résultats fournis par les profils de la 2e traversée

En bordure de Seine, nous retrouvons la banquette d'alluvions modernes, portant prés-vergers et maisons, d'altitude + 4 > large de 300 à 400 m.

Dans cette partie se trouve les profils 5 A et 5 B.

Ils sont bien entendu caractérisés par l'extrême finesse de sables siliceux d'index type-wba-asa caractérisant par exemple le profil 1 B.

Le calcaire total oscille entre 30 et 32 p. 100 en profondeur mais peut descendre à 21 p. 100 en surface.

L'humus est à 9 p. 100 en surface dans les prairies et à 4 p. 100 dans les labours. L'argile est à 16 p. 100 et plus en surface et dans le proche sous-sol, mais peut descendre à 10-11 p. 100 au-dessous de 1 m.

Le pH est à 7,2-7,3 mais voisin de 7,0 en surface, et parfois 7,5 en profondeur.

Vient ensuite une transition lente vers le marais, ici plus déprimé (jusqu'à 2,5 N. G. F.) que dans la traversée I.

Le profil 5 C, à 493 m de la Seine, présente des couches superficielles un peu plus grossières, par exemple qce-gca mais au-dessous de 50 cm on retrouve wba-aax.

La prairie, d'altitude moyenne estimée à 3,75 N G. F. est fortement humifère 15 p. 100 de matière organique en surface, et fortement argileuse, 33 p. 100 d'argile, mais 25 p. 100 en profondeur. Vers 125 cm, on passe à la tourbe sous-jacente.

Le calcaire, dans le sous-sol moyen est à 32- 33 p. 100, mais seulement 14,5 en surface, et 10 dans le début de la tourbe.

Dans les prairies suivantes, la tourbe est de plus en plus près de la surface, et la couche d'alluvions qui la recouvre est de plus en plus argileuse. C'est ce que nous avons déjà observé dans la première traversée.

Nous avons déjà montré (tableau B) que le lessivage climatique a certainement enlevé une partie notable du calcaire superficiel.

D'autre part, c'est dans le fond du profil 5 F à 860 m de la berge, que nous avons prélevé sous 70 cm d'alluvions, la carotte de tourbe qui datée

par la méthode du carbone 14, a révélé une ancienneté remontant à 160 ans après J.-C. (± 160).

A 960 m de la Seine, le Marais communal, profil 6 A, un sol très humifère en surface, est séparé de la tourbe située à 40 cm par une langue d'alluvions extrêmement argileuses, 45 p. 100, avec 14-15 p. 100 d'humus, autant de sables siliceux et autant de calcaire.

L'altitude est minimum : 2,50 N. G. F., mais certains endroits ne doivent pas atteindre 2 m. Ces points sont, bien entendu, très fréquemment sous l'eau.

Avant de quitter les alluvions argilo-calcaires, disons que la richesse superficielle en argile par rapport au reste du profil, semble due, au fait que les premiers dépôts de tourbe, lors de la transgression du 3eme siècle après J.-C. a été rapide, alors que les derniers dépôts résultent de débordements ultérieurs plus rares, d'eaux boueuses s'étalant en couches minces, et relativement d'autant plus chargée en argile que l'on s'éloignait plus de la rive.

La partie haute du marais communal, profil 6 C à 1 190 m du fleuve, est déjà sur sol sablo-caillouteux — l'altitude est évaluée à 3 m 25.

Il y a des fossés, bordés de joncs, et la terre superficielle est humifère 18 p. 100 et argileuse : 32 p. 100, mais le sable et les cailloux apparaissent vite, au-dessous de 20 cm. Le spectre des sables siliceux montre en surface un mélange de sables fins et grossiers.

En d'autres endroits, des langues de tourbe s'intercalent entre le sol sablo-humifère superficiel et le sol sablo-caillouteux profond.

Le calcaire a totalement disparu. Le pH descend à 5 en surface, mais approche de 7 dans le sous-sol profond.

Plus haut encore, à 200 m de la clôture ouest du marais, à l'altitude 3,75, le sol est sensiblement plat et sec, l'herbe est meilleure et les joncs rares. L'humus est abondant en surface (9,2 p. 100) mais décroît vite. L'argile à 11,4 en surface n'est qu'à 0,7 à 30 cm. Les sables sont plus grossiers, index à 30 cm = ech-mec. Le pH est inférieur à 5.

Dans ces terrains, où la tourbe affleure par places, il est arrivé, par été très sec, qu'une combustion souterraine de la tourbe ait eu lieu. D'après ce que nous a raconté un cultivateur, un tas de broussailles de haies ayant été allumé dans un champ tourbeux, celui-ci constata avec surprise le lendemain que la terre fumait alentour. Le feu se propagea dans la tourbe pendant plusieurs semaines et ne s'arrêta qu'avec les premières grosses pluies.

Cette mise à feu est possible parce que la sécheresse cause des fentes dans la tourbe lesquelles favorisent le passage de l'air en profondeur. Elles permettent à la combustion de se propager préférentiellement dans certaines directions, d'où apparition du feu en certains endroits éloignés du point initial. Quand la tourbe se consume longtemps au même endroit,

il se crée peu à peu une dépression en forme d'entonnoir qui subsiste dans la prairie, jusqu'à ce que au cours des ans, les alluvions des crues ou celles entraînées par les pluies, arrivent à la combler.

Toutefois ces feux de tourbe sont très rares, car il faut un concours exceptionnel de circonstances pour qu'ils prennent naissance.

Avec le profil 6 E, nous sommes à nouveau dans les labours sur alluvions anciennes. Ce champ situé à 1 360 m de la Seine est très léger, caillouteux dans le sous-sol (il est à présumer que le sol a été épierré au cours des siècles).

L'humus tombe à 2,5 p. 100 en surface, et 1 p. 100 à 50 cm. L'argile est voisine de 1,5 p. 100. Les sables ont l'index ecg-mfd, c'est-à-dire 7 à 10 p. 100 du total entre 20 et 50 μ-3 à 5 p. 100 de 50 à 100 μ — 15 à 20 p. 100 de 100 à 200 μ puis 45 à 50 p. 100 de 0,2 à 0,5 mm — 10 à 15 p. 100 de 0,5 à 1 mm et 5 à 7 p. 100 de 1 à 2 mm.

Cet index est voisin de celui que l'on rencontrait fréquemment dans les sables des alluvions anciennes de la première traversée : ecf-nfc, correspondant, rappelons-le aux pourcentages 7 à 10 — 3 à 5 — 10 à 15 — 50 à 55 — 10 à 15 — 3 à 5.

Le pH est voisin de 5 dans l'ensemble du profil, mais remonte à 6,1 en surface, par suite d'apports d'amendements calciques.

Nous verrons dans la partie agronomique, quelles sont les cultures supportées par ces terres : seigle, trèfle incarnat, rutabagas, choux, blé, orge etc... Mais signalons ici qu'à 1 km 360 du fleuve, les gelées sont plus à craindre qu'en bordure de Seine, et cela retarde, par exemple, les plantations de pommes de terre.

Le profil 6 F est tiré d'un champ légèrement surélevé : alt. + 7, jouxtant une ancienne sablière. Décrivons rapidement le profil de cette sablière.

Celle-ci offre un creux total d'environ 3,50 m par rapport au champ adjacent.

La coupe (flanc Sud-Ouest) montre de haut en bas, 40 à 50 cm d'une « terre » plus ou moins caillouteuse, plus claire vers le bas au contact avec une masse caillouteuse alluvionnaire, très dense, constituée par des silex plus ou moins émoussés et un peu roulés de toutes couleurs, (à cassures noires, grises, beiges, rousses...). Une patine blanche siliceuse recouvre la plupart d'entre eux, mais il y a aussi des surfaces ocreuses. Certains silex sont cariés.

On voit peu de sable entre les cailloux. Celui-ci est concentré en petites poches qui font des taches plus ou moins ocres sur certains flancs de la carrière. Il arrive aussi que l'ensemble du sable de la poche est blanc, avec des veines ferrugineuses.

Les géologues ont noté cette légère éminence comme dépôt de solifluction (= A de la carte géologique de Lisieux). Je ne vois pas bien com-

ment cette masse extrêmement dense et très sèche de gros cailloux a pu fluer.

Il s'agit plutôt d'une accumulation locale de pierres, à la faveur d'une légère indentation du fleuve à l'époque de son passage en cet endroit.

Le champ du profil F est naturellement très caillouteux, très sec, acide (pH = 4,9 à 5,0) mais son mode de culture lui a fourni un peu d'humus en surface (3 p. 100) et il y a un peu d'argile (5 p. 100).

On se demande jusqu'à quel point l'amendement humo-argilo-calcaire qui a dû être tiré pendant des siècles du marais tout proche, a pu modifier la structure superficielle de ces champs sablo-caillouteux. Il est certain que l'entretien régulier des fossés du marais devait à la longue fournir des quantités non négligeables de vases qu'il suffisait de transporter à quelques centaines de mètres, avec une dénivellation dérisoire de quelques mètres pour amender fortement les champs sablo-caillouteux de la bordure de ces marais.

Le profil H a été extrait d'un champ situé à 1 840 m du fleuve. L'altitude est de 5,50 m. Ce sol est peu caillouteux en surface, environ 5 p. 100 mais fournit plus de 25 p. 100 de cailloux à 70 cm.

Les sables ont principalement la formule nbg-nhc, voisine des précédentes, mais en léger retrait quant à la teneur en sables fins et ultra-fins, et corrélativement, un peu plus riche en sables grossiers.

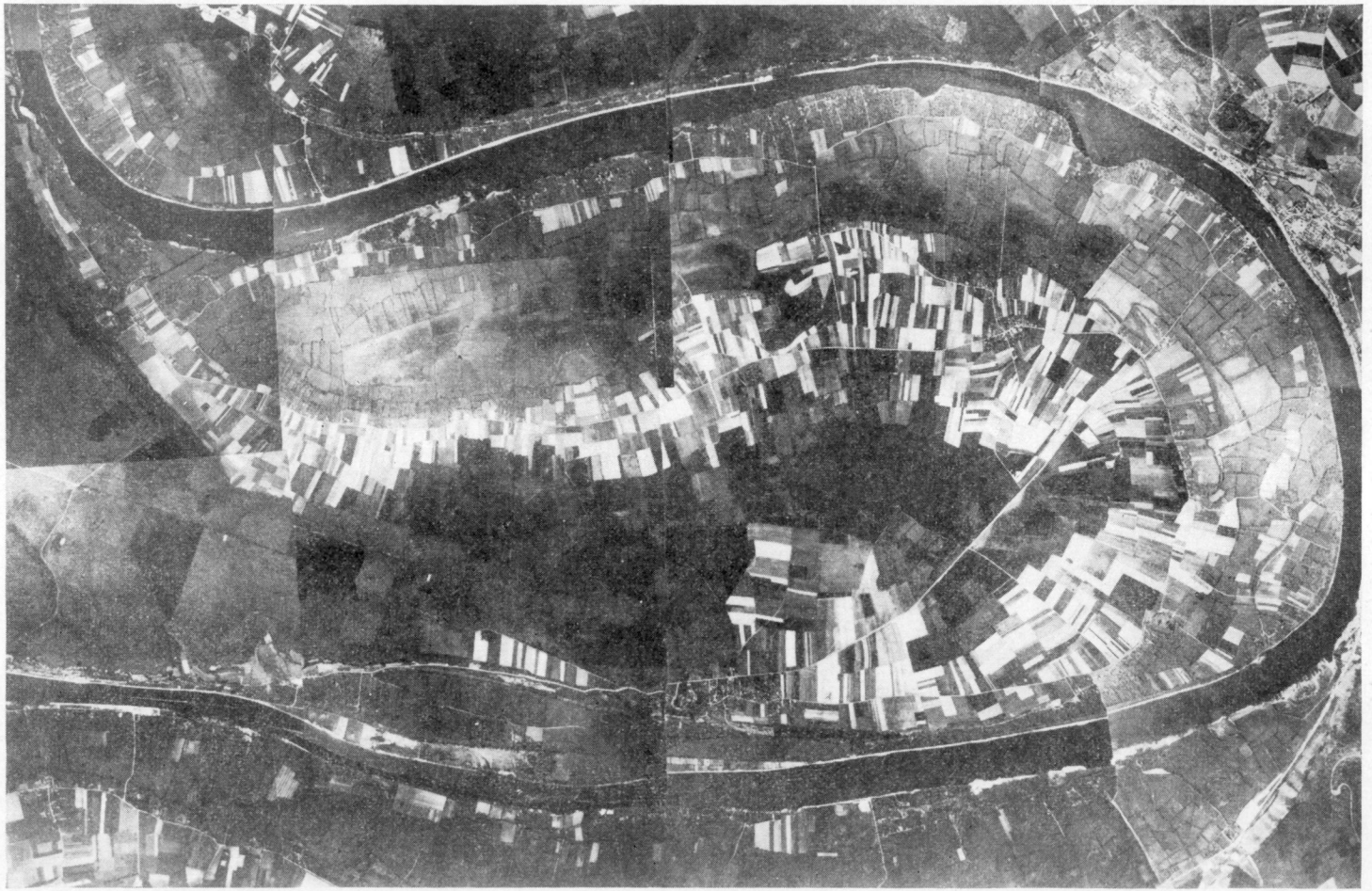
L'humus superficiel est 2,6 p. 100, l'argile environ 2 p. 100. Le pH est voisin de 5 mais à 5,8 en surface, sans doute par apports d'amendements.

Le profil 6 I est situé à 2 040 m de la Seine, de l'autre côté de la route départementale N° 45 par rapport aux champs précédents ; altitude 5 m, 8 p. 100 de cailloux en surface et 17 p. 100 à 40 cm. Humus 1,7 p. 100. Argile 1,7 p. 100 en surface et presque rien en profondeur.

Nous retrouvons le problème d'une trace d'argile sur terrain très filtrant. Il faut noter que cette présence d'argile est liée à la présence de l'humus. Outre les apports déjà indiqués de curures de fossés et de fumiers, lesquelles proviennent généralement d'étables situées sur les terrains d'alluvions argilo-calcaires, on peut penser qu'il y a aussi un très léger dépôt éolien au cours de l'été.

Il a déjà été signalé combien rapidement le pare-brise d'une voiture circulant dans la campagne se brouille momentanément quand une petite pluie se condense autour de la fine poussière limoneuse qui flotte dans l'air. Il est toutefois difficile de chiffrer cet apport sur les champs dont nous avons examiné les profils.

Plus loin du fleuve, les champs cèdent la place à de maigres bois, puis ceux-ci disparaissent à leur tour devant les maigres champs de l'essart situé entre Bardouville et Anneville, que nous avons déjà analysés à l'extrémité de notre première traversée.



Les sols du méandre de Duclair (R. G.).

ZONES DE CULTURES ET VALEURS AGRONOMIQUES

Nous allons, pour débuter ce chapitre, exposer l'état des cultures avant la guerre de 1914.

Nous examinerons ensuite l'état des cultures entre les deux guerres mondiales, celui existant après 1945, l'évolution actuelle et enfin les prévisions d'avenir.

Nous suivrons la grande division naturelle des alluvions anciennes et des alluvions modernes, et nous examinerons la presqu'île de l'Est à l'Ouest, c'est-à-dire dans le sens du courant.

Prenons comme type la commune d'Ambourville.

La partie sablo-caillouteuse, c'est-à-dire les alluvions anciennes, se divise en plusieurs zones.

1° Une zone garnie de bois qui occupe les parties élevées, approximativement entre 20 et 40 m.

Le sol très caillouteux et très filtrant, à plan d'eau profond, est naturellement très sec. Il ne porte pratiquement que des taillis de bouleaux et de chênes.

2° A la limite inférieure de ces bois, dans la zone des 15 à 30 m, se trouvent « les hauts », c'est-à-dire les parties sablo-caillouteuses cultivées les plus élevées et les plus éloignées de la Seine.

Les champs sont toujours très caillouteux et très secs. La carte géologique les note a^{1a} = alluvions anciennes hautes terrasses.

3° Plus bas, entre 15 et 5 m environ, les alluvions anciennes sont souvent mélangées de dépôts de solifluxion, quoique ce terme soit employé un peu abusivement sur la carte géologique de Lisieux, où certaines accumulations caillouteuses ne résultent pas d'un fluage, mais d'un particularisme local du fleuve préhistorique. Dans ce cas la structure est meilleure.

Sur la carte géologique, ces zones sont notées a^{1b} = alluvions anciennes basses terrasses et A = dépôts de solifluxion.

4° Sur le versant crayeux, à l'Est, une zone d'environ 200 m de large sur 800 m de long pour une dénivellation de 40 à 25 m (pente moyenne de 7,5 p. 100), présente une meilleure structure que les Hauts uniquement sablo-caillouteux.

Ceci est dû à la proximité du substratum de craie sénonienne C^{7a} relativement imperméable et à la moindre acidité du sol, avec corrélativement une moindre pauvreté en matière organique.

Cette zone se prolonge au Sud sur la commune de Bardouville.

A ces divisions naturelles des alluvions sablo-caillouteuses, se superposent, surtout dans la zone basse, des différences culturales : amendements calciques et humiques, engrais, etc... qui de nos jours peuvent atteindre une assez grande ampleur.

Période précédant la première guerre mondiale

Avant 1914, il n'y avait pas d'assolement bien défini. Les fermes plus nombreuses et moins étendues qu'aujourd'hui, comprenaient quelques champs sur sables et cailloux (avec généralement d'autres champs et des pâtures dans le Marais), et l'on s'efforçait de tirer le meilleur parti de la nature du sol suivant qu'il se trouvait dans l'une ou l'autre des zones décrites ci-dessus.

Il n'y avait alors aucun apport d'engrais minéral. Le seul engrais étant le fumier, peu important, car il y avait peu de bêtes, faute de nourriture. Ce fumier était réservé aux meilleures terres et en particulier aux pommes de terre.

L'emploi de l'amendement calcaire était rare. Dans la zône des Hauts, la plus sèche et la plus pauvre, ne pouvaient réussir que le seigle et le trèfle incarnat. Les meilleurs champs voyaient la succession continue de ces deux plantes, avec des rendements de 6 à 8 quintaux pour le seigle. Très souvent les champs proches des bois étaient abandonnés, car il fallait tenir compte du lapin qui pullulait.

Plus bas la culture type était la suivante :

Année A : Seigle de Pays, semé mi-octobre et récolté entre le 10 et le 20 juillet de l'année B. Rendement de 9 à 12 quintaux.

Année B : Trèfle incarnat semé début août et fauché entre le premier et le 10 juin de l'année C avec des rendements de 2 000 à 2 500 kg/ha de foin.

Si le semis avait été précoce et bien réussi, on faisait pâturer à l'automne « pour arrêter ». Outre l'apport de nourriture, très utile, on peut penser que cette pratique était efficace contre la maladie à sclérottes, très fréquente dans ces terres acides par automne doux. Un beau trèfle, « fougueux », non arrêté, « s'en allait » l'hiver peu à peu. L'arrêt constituait aussi une prévention contre la gelée.

En cas de disette de fourrage, au début de l'année C, on faisait pâturer le trèfle au printemps, mais la repousse était généralement rendue médiocre par la sécheresse et la récolte finale s'en ressentait.

Année C : Aussitôt après la récolte du trèfle incarnat que l'on s'efforçait de rendre précoce, une partie du champ était plantée en pommes de terre destinées à la vente, car à l'époque, la culture de ce tubercule n'était pas développée dans le limon des plateaux. La surface plantée était d'autant plus grande que la terre était meilleure et que l'on pouvait disposer de plus de fumier, donc généralement de terres dans le marais. Le fumier était épandu sur les chaumes de trèfle avant le labour.

Dans la terre légère, la pomme de terre venait vite, et de bonne

qualité, mais les rendements n'étaient pas très élevés, de l'ordre de 3 à 4 t/ha en bonne année.

La partie restante était ensemencée en engrais vert, généralement en navette, très rustique ; plus rarement en colza, plus exigeant.

Après pomme de terre, on ensemençait quelquefois en avoine d'hiver, mais il y avait risque de gelée.

Sur la partie en engrais vert, on semait du seigle, tardivement. Sur ces sols, les semis d'automne peuvent être tardifs, pour profiter des pluies, mais inversement les semis de printemps doivent être hâtifs.

Année D : Sur la partie récoltée en pommes de terre, on ensemençait généralement de l'avoine de printemps aussi précocement que possible pour éviter l'effet de la sécheresse, et plus rarement un peu d'orge. En année sèche, l'avoine était très médiocre au point de rester presque à raz de terre et de ne pas épier. On la faisait alors pâturer. Après récolte des céréales, on remettait toute la pièce au trèfle incarnat. Les moins bons cultivateurs remplaçaient le trèfle par une jachère non travaillée, abandonnée aux mauvaises herbes.

Année E-A : Toute la pièce était ensemencée en seigle après récolte du trèfle ou après jachère et le cycle recommençait.

Période comprise entre les deux guerres mondiales

Il n'y a pas de changements notables. Les engrais font timidement leur apparition peu avant la fin de la période, sous forme de nitrate de soude et de nitrate de chaux uniquement en couverture sur les céréales. Il n'est pas encore question d'engrais phosphatés et potassiques.

Dans cette période, l'utilisation de l'araire à âge en bois et soc en fonte était encore très courante. Le brabant ne s'est pas répandu parce que, dans le marais labourable, il faut faire des billons.

Période de 1945 à nos jours

C'est une période d'amélioration très nette, surtout depuis quelques années sous l'influence du Centre d'Enseignement post-scolaire agricole de Saint-Pierre de Varengeville (1).

Après la deuxième guerre mondiale, presque tous les cultivateurs avaient essayé la culture du blé dans les sables.

Au début, les variétés employées étaient surtout celles des régions chaudes et sèches, tel que Rouge de Bordeaux, Wilson et aussi Bon Fermier, Dattel. Actuellement on trouve Bellevue, Renfort, Aisne, Yveline et Vague d'Epis, mais pas de Cappelle.

(1) Dont le Directeur M. CARRÉ, que nous remercions bien vivement, nous a fourni une ample documentation pour cette partie de notre exposé.

Par contre la culture de la pomme de terre pour la vente a été abandonnée, à la suite des gros rendements obtenus sur le plateau limoneux.

On peut schématiser comme suit la rotation type de ces dernières années.

L'ancien Seigle de Pays à 2 rangs et longue paille est actuellement remplacé par la variété Petkus.

Année A \ Blé 1/5 de la surface.

Récolte de / Seigle 4/5 de la surface.

Après récolte, semis début août de trèfle incarnat sur tout le champ. On commence aussi à semer de la Serradelle en terre acide, dans le Seigle.

Année B : Récolte de trèfle début juin. Une toute petite partie est mise en pommes de terre pour la consommation de la ferme.

Année C : 1/10 avoine de printemps (Soleil II — Ligowo Brie — Pluie d'or)

4/10 d'orge (Rika — Isaria) sauf dans les hauts, où l'orge vient mal.

2/10 rutabaga qui est bien adapté à ces sols et quelques rangs de pommes de terre.

3/10 engrais vert : navette, et de plus en plus, Serradelle, qui vient bien en terre nettement acide (et pousse mal au-dessus de pH = 6).

On préfère souvent semer la serradelle à la place du trèfle incarnat, mais en plante abri (seigle) à cause des mauvaises herbes très nombreuses (Chénopodes) qui nuisent au semis direct. Inversement, en année sèche, la serradelle souffre quand la plante abri est coupée.

Après l'avoine, l'orge et l'engrais vert, on sème du seigle. Parfois un peu de blé sur engrais verts.

Sur pomme de terre et rutabaga, on ensemence en blé. Ce sont les meilleures terres, et on sème plus tard que le seigle.

On rencontre actuellement une rotation encore plus évoluée (à la limite Ambourville/Berville).

Année A : 1/5 blé 4/5 seigle.

Puis trèfle incarnat sur toute la pièce (les terres étant neutralisées, la serradelle est moins indiquée).

Année B : après récolte du trèfle.

1/3 betteraves fourragères (collet vert...) avec tendance à diminuer au profit des choux.

1/3 rutabaga.

1/3 choux fourragers (surtout depuis 1950). Variétés Chollet, Sarthe, Gros Gigot, Coulet des Flandres, Cavalier rouge, Cavalier vert...

Puis semis de blé sur betteraves et rutabaga.

Année C : Sur choux débarrassés précocement, semis d'orge (plus rentable et plus utilisable que l'avoine) et un peu d'avoine.

En année sèche l'orge Rika ne dépasse pas 30 cm, mais atteint 0,90 à 1 m en année humide.

L'orge est utilisé pour l'engraissement des porcs, en remplacement de la pomme de terre d'autrefois. Quelques rares cultivateurs, surtout d'origine belge, font encore beaucoup de pommes de terre.

Après récolte de l'orge, de l'avoine et du blé, semis de seigle pour avoir 4/5 du champ et resemis de blé sur 1/5.

Année D = A : Récolte des céréales et semis de trèfle incarnat sur toute la pièce.

Le topinambour a été essayé et réussit bien. En particulier il donne une récolte sûre en année sèche dans les plus mauvais terrains.

Mais les cultivateurs lui reprochent une récolte trop difficile, et seul l'un d'eux persévère dans cette commune.

Apports d'engrais : Actuellement, presque tous les cultivateurs emploient les engrais minéraux, mais la plupart au petit bonheur, suivant état des finances et propositions des marchands d'engrais.

Les bons cultivateurs emploient les scories potassiques ou le PK 300 à l'automne pour le *blé*, ou encore de la potasse à l'automne et du super en couverture au printemps, au moment de l'apport d'azote. On met alors 80 à 100 unités de P_2O_5 et de K_2O et 40 à 50 unités d'azote en 1 ou 2 fois.

Sur *betteraves* (de moins en moins cultivées) on apporte du fumier (tout ce qui est disponible) et généralement un engrais complet (PEC 10-10-10) avant semis ; ou des scories potassiques avant l'hiver et de l'ammonitrate avant semis.

Pour les *pommes de terre* (consommation de la ferme) un 10-10-20 avant la plantation apportant 80-80-160 unités/ha ou des engrais séparés : ammonitrate (en deux fractions) — super et chlorure de potassium.

Pour les *choux*, les bons cultivateurs apportent du fumier et des scories potassiques (ou PK 300) par exemple 400 à 500 kg de PK 300 19-19 ou 500 à 700 kg de scories 12-12 soit de 60 à 90 unités/ha de chaque élément.

Ces engrais sont souvent répandus sur le trèfle incarnat précédant les choux.

On trouve encore beaucoup de cultivateurs, surtout à Anneville et Yville, qui n'emploient pas d'engrais pour les choux, ni même de fumier.

Avec ces engrais, judicieusement appliqués, voici les rendements moyens actuels :

En année sèche :

Seigle = 20 à 25 quintaux — Avoine = 7 à 10 quintaux — Orge = 10 à 15 quintaux — pomme de terre Bintje = 10 à 12 tonnes — Betteraves fourragères = presque nulle. Topinambour = 35 à 45 tonnes — Trèfle incarnat = 3 tonnes.

En année humide :

Seigle = 20 à 30 quintaux — blé = 15 à 25 quintaux — avoine = 20 à 25 quintaux — Orge = 25 à 30 quintaux — betteraves = 25 à 30 tonnes — Topinambour = 35 à 50 tonnes — Choux sans engrais = 20 à 25 tonnes — Choux avec bon engrais = 40 à 80 tonnes.

On remarquera que le seigle et le topinambour résistent remarquablement à la sécheresse, alors que les betteraves fourragères et l'avoine ne rendent qu'en année humide.

Les rendements en serradelle sont difficiles à évaluer, car la plante est pâturée (alors que le trèfle incarnat est bottelé). D'après des essais effectués par Monsieur CARRE, une serradelle semée tôt peut produire 8 à 12 t de fourrage vert en année sèche et plus de 20 t en année humide.

Il y a un regain, qui est pâturé en arrière-saison, avant d'être retourné pour faire du seigle ou de l'orge. Nous donnerons ultérieurement quelques précisions sur cette intéressante plante fourragère.

LES ZONES DE CULTURE DANS LES ALLUVIONS MODERNES

Nous savons, par les analyses rapportées ci-dessus, que l'on peut distinguer 3 zones principales :

1° Une sorte de banquette de quelques centaines de mètres de largeur, rarement inondée, d'altitude égale ou un peu supérieure à 4 m, relativement peu argileuse 12 à 16 p. 100 en surface, assez humifère 5 à 10 p. 100, fortement calcaire 25 à 30 p. 100.

Cette banquette est pratiquement comprise entre la Seine et un chemin vicinal, grossièrement parallèle ainsi que nous l'avons déjà indiqué.

2° Une arrière banquette, devenant peu à peu légèrement plus basse de quelques décimètres et de plus en plus argileuse, de 20 à 30 p. 100 et au delà, avec corrélativement une forte teneur en matière organique en surface dans les prairies restant humides, par exemple 15 p. 100, mais décroissant en profondeur.

Sous les alluvions très imperméables de cette arrière banquette se trouve généralement une couche de tourbe, sensiblement horizontale, qui est d'autant moins loin de la surface que les alluvions sont moins épaisses.

3° Enfin une troisième zone est constituée par les parties les plus basses, le Marais proprement dit, baignant plus ou moins longtemps dans l'eau suivant l'altitude, l'année et l'état des fossés d'évacuation.

Comme pour les cultures en régions sableuses, nous prendrons surtout des exemples dans la partie N. E., et nous indiquerons les variations que l'on peut relever pour les différentes communes.

D'une façon générale, chaque ferme possède une partie sur les sables, où sont les cultures, et une partie en marais où sont les herbages plantés, les prairies fauchées et un peu de cultures que l'on ne pourrait faire sur sables.

Le rapport entre la partie sur sables et la partie sur alluvions modernes est de l'ordre de 3/2, par exemple pour 52 ha d'une ferme de Berville, 31 ha sont en sables et 21 ha sont en marais.

Une ferme d'Ambourville, de grandeur et de rapport sable/marais analogues possède 1/2 ha d'herbage planté entourant le corps de ferme, sur la banquette, 20 ha de prairies fauchées sur la banquette et l'arrière banquette et 3 ha de cultures sur la banquette.

Les herbages plantes

Remarquons que les labours se font, en principe sur les parties les plus hautes, donc sur la banquette, alors que les prairies de fauche se font presque toujours après le chemin vicinal, sur l'arrière banquette ainsi que l'on peut facilement le constater sur les photographies aériennes (p. 697).

De même, les arbres fruitiers, qui ne doivent pas séjourner longtemps dans l'eau, sont toujours plantés sur la banquette.

Les plantations de pommiers à cidre remontent très loin dans cette région sans doute dès leur introduction.

Elles partent toujours de la berge (ou du chemin de halage s'il existe) et s'étend généralement jusqu'au chemin vicinal.

Les arbres sont généralement tassés, et assez en désordre, du fait des replantations entre les rangées initiales. L'herbe est parfois un peu rare quand la plantation est trop serrée, et bien entendu ne peut être que pâturée.

C'est dans ces herbages plantés que se trouvent les maisons et les bâtiments de ferme.

Entre ces herbages, ou à leur extrémité, se trouvent les quelques pièces de terres labourées en zones d'alluvions modernes. Ces labours voisins de la Seine sont assez nombreux sur Ambourville et Berville, notamment en face de Duclair, mais très rares sur Anneville, où ils sont reportés après le chemin vicinal et avant les prairies de fauche.

Souvent l'un des grands fossés drainant le marais borde l'herbage.

Depuis longtemps, une partie des pommiers des herbages sont à fruits de table, et quand ils sont soignés, ils peuvent, de nos jours, produire du fruit de bonne qualité et de vente rémunératrice.

Une variété est assez caractéristique de la Vallée de Seine : « Bénédictin ». ainsi appelée parcequ'elle fut propagée par les moines de l'abbaye

de Jumièges. C'est une grosse pomme, de très bon goût, 1/2 précoce dont la conservation normale n'atteint pas janvier.

Les inconvénients de cette variété sont sa mise à fruit tardive et son irrégularité de production.

On rencontre également beaucoup de Bailleul, de Reinette de Caux, de Reinette d'Angleterre, de Reinette de Cusy, et pas mal de pommes sans nom.

Mais le pommier n'est pas le seul arbre à fruits de table. On trouve aussi beaucoup de pruniers (variété « Verte bonne » en majorité, puis « Gaillon », « Prune d'avoine » (à confiture) « Prune cerise » (précoce, tend à disparaître)), parfois même deux fois plus de pruniers que de pommiers.

Quelques bigarreautiers complètent l'assortiment.

Dans une ferme de Berville de 50 ha, les arbres des herbages sont dans la proportion suivante :

855 pommiers à cidre — 200 pruniers — 135 pommiers de tables — 10 bigarreautiers.

Un seul cultivateur, à Ambourville et un autre à Bardouville, ont créé récemment un verger de basses tiges, avec Bénédictin, Reine des Reinettes, Boskoop, Jonared, Jonathan, Cox's Orange, Golden delicious, soit sur anciens labours, soit sur herbages retournés. Ces vergers sont naturellement bien entretenus.

Disons en passant que l'on essaie aussi le cerisier dans les sables avec le porte-greffe Sainte-Lucie.

Le traitement des arbres fruitiers des herbages plantés est presque partout inexistant. On se borne à couper, de loin en loin, les branches mortes.

Quand les pommiers à cidre ont été greffés en pommiers à couteaux, notamment depuis la dernière guerre, on pratique de plus en plus l'élagage, afin de laisser plus de lumière à l'arbre et aux fruits, mais les cultivateurs sont trop occupés par leurs champs sur sables pour consacrer beaucoup de temps à leur verger.

D'autres part ces herbages ne reçoivent presque jamais d'engrais, parfois un peu de Scories Thomas si l'on en a acheté pour les champs sur sables.

Prairies de fauche

Une partie de la banquette, mais surtout l'arrière banquette plus basse et plus argileuse, toujours très calcaire, sont consacrées aux prairies de fauche.

Les parcelles sont de grandeur variable, au plus 2 à 3 hectares, et sont limitées par les haies et souvent de petits fossés.

Dans la commune d'Ambourville, ces prairies sont peu inondées,

mais à Berville, elles peuvent baigner pendant 2 ou 3 mois et plus encore à Anneville.

Comme le terrain est presque toujours humide, la production est assez forte, mais la flore n'est pas très bonne.

Avant 1939, on récoltait environ 4 000 kg de foin. Actuellement les bons cultivateurs apportant des engrais, par exemple 55 kg de scories potassiques ou de PK 300, obtiennent 6 000 à 7 000 kg en bonne année.

Plus récemment, on préconise un apport de superphosphate et de chlorure à la sortie de l'hiver, avec du nitrate ou de l'ammonitrate (30 kg d'azote) comme engrais azoté rapide, ou du sulfate d'ammoniaque si la question précocité est moins importante.

Jusqu'ici la flore comprend plus de plantes adventives que de graminées proprement dites. On trouve du dactyle, de la houlque laineuse, des fétuques, un peu d'agrostis, beaucoup de plantes à rosettes : pâquerettes, pissenlits, plantain, salsifis sauvage... des renoncules, des centaurées, des rhinanthes crête de coq, des colchiques, beaucoup de prêles, des cardamines, grande berce, etc...

On a parfois des accidents avec la prêle qui reste toxique dans le foin, alors que la colchique l'est moins en sec.

Un cultivateur d'Ambourville a fait un essai de traitement aux hormones. On réussit à éliminer le rhinanthe, mais il y a peu d'effet sur la colchique. De toute façon, l'effet est limité à 1 ou 2 ans et s'avère alors trop coûteux.

Les traitements culturaux se résument à un hersage contre les taupinières et au curage des fossés (fossés d'environ 1 m de profondeur). On estime qu'un quart seulement des cultivateurs effectue actuellement ce travaux d'entretien.

Il existe quelques rares surfaces fauchées dans les marais communaux : 5 à 8 ha à Berville, mais 1 ha à Ambourville (plus sec) et 20 ha à Yville. Ces foins communaux sont vendus aux enchères sur pied.

Notons enfin que le regain est très généralement pâturé. Dans ces cas, les animaux évitent les plantes dangereuses, telles que les prêles.

Les prés communaux

Les plus mauvaises parties du marais, celles qui baignent le plus longtemps appartiennent aux communes. On en compte 7 ha à Ambourville, 100 ha à Yville ; mais à Anneville, il y a 212 ha de marais communaux.

Ces prés baignent de 2 à 5 mois dans l'eau, suivant les années, entre novembre et mars ; mais comme nous le soulignerons plus loin, ce temps pourrait être fortement réduit si on entretenait les fossés et si des vannes antimarées étaient disposées à leur sortie en Seine.

Actuellement, ces prairies sont pratiquement abandonnées et sont extrêmement dégradées. Il y a très peu d'herbe, mais beaucoup de menthes sauvages, à racines traçantes très coriaces, des chardons, des renoncules, des laiches, etc...

Bien entendu, on ne saurait entretenir de bonnes laitières sur un tel terrain, mais on y trouve des chèvres, quelques maigres vaches de pauvres cultivateurs, des chevaux et aussi des troupeaux d'oies.

Les prés sont accessibles au plus tôt au début de mai et sont utilisables jusqu'à fin novembre, mais à ces dates extrêmes, les animaux pataugent dans l'eau.

En 1958, les marais d'Ambourville reçurent 4 chevaux et 20 bovins, et nous l'avons dit, quelques parcelles sont fauchées.

A Berville, les marais sont plus étendus. On a noté environ 80 bétons d'élevage et 20 à 25 vaches, ainsi que 20 chevaux et 250 à 350 oies.

Le prix de location, pour la saison, est de 800 francs par tête de bovin et 1 200 francs par cheval (1958).

A Anneville, où le marais est en cours d'assainissement, le prix est actuellement de 2 000 francs par tête de gros bétail, 2 500 francs pour les poulinières, et 2 000 francs pour le troupeau de 20 oies (11 troupeaux en 1958).

Les crédits pour les travaux d'assainissement des marais d'Anneville sont sur le point d'être votés et déjà un grand fossé (fossé Chauvon) a été approfondi à 3 m. Il en résulta qu'à fin novembre 1958, la partie drainée par ce fossé n'était pas encore inondée.

Il faut bien comprendre, en effet, que l'eau séjournant en hiver dans les bas-marais provient à la fois des pluies d'automne et d'hiver, et des grandes marées. Quand les fossées sont colmatés jusqu'à 20 ou 30 cm de leur sommet, toutes les terres au-dessous de la cote de cette vase restent inondées car nous l'avons vu, les alluvions modernes très argileuses de l'arrière banquette et du marais sont très imperméables.

En été, seule la chaleur solaire arrive à évaporer l'eau des bas-fonds.

La réfection du drainage est donc la première mesure à entreprendre pour rénover les marais communaux. Par la suite, viendront les questions de resemis de graminées adaptées, de fertilisation et de lutte contre les mauvaises herbes.

Les labours en terres d'alluvions modernes

L'avantage de la terre d'alluvions modernes pour la culture, est sa relative richesse et sa capacité en eau. L'inconvénient est son échauffement tardif au printemps, parfois sa forte teneur en calcaire, et sur l'arrière banquette, sa trop forte teneur en argile et sa submersion possible.

Les terres fortements argileuses sont très difficiles à travailler. C'est

de la boue en hiver et de la brique en été. Le cultivateur doit avoir une grande habitude pour la saisir au bon moment.

Il en résulte que la proportion des terres labourées par rapport aux herbages est faible. On a environ 10 de labour contre 100 de prairies à Bardouville, et la partie voisine d'Ambourville ; environ 15 contre 100 à Berville et partie voisine d'Ambourville ; 10 contre 100 à Anneville, mais 15 à 20 à Yville, à la racine ouest du méandre. En outre, sur Yville plusieurs labours touchent à la Seine, en remplacement d'herbages plantés.

Avant 1914 et même 1939, la terre d'alluvions modernes permettait de faire un peu de blé et un peu de betteraves. On avait 3 soles : 1/3 betteraves, 1/3 blé, 1/3 avoine + trèfle violet. Dans l'avoine était semé un trèfle violet.

Actuellement l'avoine est remplacée en partie par l'orge (Rika) et on ne sème pas toujours du trèfle si on a assez de fourrage par ailleurs. On remplace le trèfle par un second blé.

Un cultivateur a essayé le maïs (variétés Goudster, et aussi W 240, INRA 200 et INRA 244). En 1958, l'année trop froide et trop pluvieuse a limité le rendement à 25 ou 30 quintaux (estimés) contre 45 quintaux dans les sables.

La *betterave* est généralement la 1/2 sucrière collet vert dont la récolte en 1958 est estimée à 20-25 tonnes, mais en bonne année, en terre bien fumée, on obtient 60 à 80 tonnes.

Avant 1914 et même avant 1939, on n'apportait pas d'engrais, mais du fumier, environ 20 tonnes.

Aujourd'hui, le cultivateur apporte généralement un engrais composé 10-10-10 ou 10-10-20 avant semis. Les agriculteurs qui veulent raisonner emploient le super et le chlorure de potassium, avec un ammonitrate pour un équilibre 1-1, 5-2.

Les travaux culturaux consistent en un petit labour pour enfouir le fumier, en novembre ou début décembre, un grand labour de 25 à 30 cm fin avril, suivi d'un croskillage, de hersages, etc...

Le semis se fait fin avril-début mai.

Les variétés danoises, plus riches en matière sèche donnent moins de rendement brut à l'hectare (au maximum 60 tonnes) mais le rendement en matière sèche par hectare est cependant supérieur à celui de la demi-sucrière.

Avant 1939, les *blés* cultivés étaient surtout l'hybride 27 Vilmorin, et aussi quelques autres (Wilson...). En bonne année on obtenait 18 à 20 quintaux.

Actuellement on trouve presque partout le Cappelle, qui fournit, fumé, 30 à 35 quintaux en année normale (20 à 25 en 1958).

On sème vers le 15-20 octobre mais parfois jusqu'à fin décembre.

La fumure d'automne comprend 80 à 90 unités P_2O_5 du super et 80 à 100 K_2O du chlorure. Après l'hiver on apporte peu d'azote, car la terre est riche en matière organique et on craint la verse. On apporte généralement moins de 40 unités, de l'ammonitrate.

Beaucoup de cultivateurs ne mettent qu'un peu de scories ou de scories potassiques ou de PK 300 à l'automne.

On a intérêt à apporter le super en fin d'hiver, jusqu'à fin avril. Le résultat est souvent spectaculaire.

Pour *l'avoine,* les mêmes variétés en principe que dans les sables. On n'apporte pas d'azote et rarement une fumure phosphopotassique. On sème un peu avant les betteraves, au début d'avril si le sol a pu être travaillé tôt.

En bonne année, en bonne terre, on obtient 30 à 35 quintaux mais seulement 20 à 25 quintaux pour l'ensemble des cultivateurs.

L'*orge* qui est une culture relativement récente et encore rare dans les marais, reçoit plus d'attention. On fume souvent avec un 8-16-16, environ, 400 kg et dans ce cas on récolte en bonne année 30 à 40 quintaux.

La semis (variété Rika) se fait comme pour l'avoine.

Le *maïs* dont nous avons dit qu'il était à l'essai dans le marais, notamment avec la variété « Goudster » se sème au plus tôt au 15 mai (contre 1 au 10 mai dans les sables) et se récolte fin octobre à mi-novembre (contre premiers jours d'octobre dans les sables).

Nous avons déjà dit que l'année 1958 a été très défavorable au maïs dans le marais alors que la récolte était bonne dans les sables. Nous aurons l'occasion de présenter cette culture en vallée de Seine dans des publications ultérieures.

En résumé, la culture dans le marais était surtout entreprise autrefois pour se procurer une réserve de betteraves fourragères pour la nourriture hivernale des vaches, culture qui était pratiquement sans rendement dans les sables.

On en tirait également un peu de blé pour le pain de la ferme et surtout de l'avoine pour les chevaux, avec quelques bottes de trèfle violet.

Aujourd'hui, grâce aux engrais et aux moyens de culture améliorés, on essaie d'étendre les espèces cultivées, mais certaines restent pratiquement impossible à cause de la nature du sol, comme la pomme de terre, et surtout le topinambour.

Notons que, même sur les emplacements relativement sains, la culture en planches reste indispensable. En terrain très humide, les planches n'ont pas plus de 10 mètres de large ; dans les terrains sains on peut les porter à 20 m.

A cause de la courbe de la Seine, les champs, ainsi que les planches ont très souvent une forme trapézoïdale, ce qui oblige à de nombreux court-tours.

Ceci est d'autant plus obligatoire que les cultivateurs qui ont remplacé la charrue ordinaire par le brabant pour travailler dans les sables, sont amenés à utiliser également le brabant dans le marais.

Notons encore, que certains cultivateurs ne pouvant consacrer par exemple qu'un demi-hectare aux cultures en marais, se contentent de faire succéder indéfiniment blé et betteraves.

Il en résulte un fort développement du rhizoctone violet et de la betterave, qui persiste d'autant mieux que ces petits cultivateurs n'ont pas encore assimilé la notion d'hygiène phytopathologique, et jettent les betteraves avariées sur le fumier.

RÉSUMÉ ET CONCLUSION — AVENIR DU TERROIR

L'étude historique et analytique que nous avons entreprise a permis de mettre en relief les facteurs ayant contribué à la formation de cet ensemble représentatif de la Vallée de Basse-Seine qu'est la boucle de Duclair et nous a fourni les caractéristiques basées sur l'étude systématique des profils.

Nous avons trouvé, depuis la bordure de Seine jusqu'au plateau de Bardouville :

1° Banquette argilo-calcaire, d'altitude N G F = 4 m, pratiquement à l'abri des eaux, portant les bâtiments au milieu d'herbages plantés, et quelques champs labourés.

2° Arrière banquette, d'altitude décroissante en s'éloignant de la Seine, de plus en plus argileuse et humifère, et toujours très calcaire.

Assez souvent inondée, cette arrière banquette porte des prairies de fauche et quelques labours.

3° Marais proprement dits, inondés plusieurs mois de l'année dans les parties basses (pouvant descendre à 2 m N G F) et portant de maigres pâtures communales.

4° Alluvions sablo-caillouteuses basses, relativement fertiles par suite de la proximité du marais et des fermes.

Elles portent les bons champs sur sables.

5° Les alluvions sablo-caillouteuses sur sous-sol calcaire de la petite falaise de Bardouville.

A cause de la rétention partielle de l'eau au niveau de la surface calcaire et de la neutralisation du sol, cette petite zone porte les meilleurs champs sur sables.

6° Les « Hauts » c'est-à-dire la zone sablo-caillouteuse la plus élevée, très filtrante ; très pauvres en colloïdes, acide, très caillouteuse, portant de maigres champs ou de maigres bois.

Au point de vue utilisation agronomique, nous avons vu, qu'après quelques épisodes heureux au XVIIe et XVIIIe siècle, grâce à des cultures

spéciales, d'ailleurs localisées, ces sols produisaient très peu avant 1914 et même 1939.

Ceci provenait de la pauvreté intrinsèque des « sablons » d'une part, et de l'inondation périodique des « marais » d'autre part.

Par une sorte de cercle vicieux, les terres produisant peu, les cultivateurs étaient pauvres, et étant pauvres, ceux-ci ne pouvaient entreprendre d'améliorations.

Depuis la seconde guerre mondiale, grâce aux facilités apportées par les engrais minéraux, grâce aux enseignements prodigués par la Direction des Services Agricoles et en particulier, pour cette région, par le centre postscolaire agricole de Saint-Pierre de Varengeville, grâce aux prêts du Crédit Agricole, grâce enfin aux conseils de fumure après analyses des sols soumis à la Station Agronomique de Rouen, en voit la grande culture de la basse vallée de Seine évoluer peu à peu et devenir compétitive sur certains points, par exemple dans la culture du maïs précoce sur sables et dans l'utilisation des prairies et des choux fourragers.

La réussite des cultures est liée à une meilleure répartition des engrais organiques, à une judicieuse adaptation des engrais minéraux, et au choix des variétés.

La réussite des prairies est, d'abord, liée à une rénovation du système des fossés d'écoulement des eaux, telle que celle actuellement entreprise sur le commune d'Anneville.

Nous ne nous étendrons pas en détail sur l'avenir, nous réservant de la faire dans une publication ultérieure.

Dans un prochain mémoire, nous exposerons la situation, la composition et l'exploitation agronomique des terrains placés sur la rive droite, à la fin de l'estuaire, depuis Tancarville jusqu'à Norville, c'est-à-dire au nord de ce que l'on pourrait appeler le méandre de Vieux Port.

RÉSUMÉ

Cette étude historique et analytique d'un des méandres de la vallée de la Basse-Seine, amène les auteurs à décrire en détail les différents sols rencontrés dans cette région et permet de suivre les vicissitudes de cette Boucle de la Seine qui ne présente un intérêt économique (maïs précoces sur sable, choux, fourrages, prairies) que depuis la généralisation de l'emploi des engrais minéraux et organiques et du choix des variétés.

SUMMARY

Contribution to the study of soils in the lower Seine valley.

In this historical and analytical study of a part of the lower Seine valley, the different soils of the region are described in some detail. The study discusses the vicissitudes of this region of the Seine bend which had no economical importance (early maize on sands, cabbage, grassland) before the use of mineral and organic fertilizers and the selection of varieties have become general.

ZUSAMMENFASSUNG

Beitrag zur Untersuchung des Nieder-Seinetales

Diese historische und analytische Studie einer der NiederSeine Mäander führt die Autoren zur ausführlichen Beschreibung der in dieser Gegend gefundenen Böden und erlaubt das Schicksal dieser Seinewindung zu folgen, die erst seit der Verallgemeinerung der Anwendung von mineral und organischen Düngern und von angepassten Sorten eine wirtschaftliche Bedeutung gewann (Frühmais auf Sandböden, Futterkohl, Weiden).

К изучению земель долины Нижней Сены.

Е. ЖУИС, Т. ЛЕКАШЭ и Е. КОШИ. (Руан.)

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Это изучение, историческое и аналитическое, одной извилины долины Нижней Сены приводит авторов к детальному описанию различных почв, встреченных в этой области, и позволяет следить за непостоянством этого изгиба Сены, который представляет экономический интерес (скороспелый маис на песке, кормовая капуста, луга) только со времени вхождения в обычай употребления минеральных и органических удобрений и при выборе подходящих сортов растений.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) Apel. — Profils géologiques et notes archéologiques intéressant la région comprise entre Lillebonne et Quillebeuf. Bulletin de la Société des Amis des Sciences Naturelles de Rouen, p. 439 à 451, 1905.
(2) Brioux (Ch. et Jouis (Edg.). — Les alluvions anciennes et modernes de la Vallée de Seine. Annales agronomiques 1er trimestre 1942.
(3) Chaput (E.). — Recherches sur les terrasses alluviales de la Seine. Bulletin des Services de la carte géologique de la France, nº 153. T. xxvii. 1922-1923.
(4) De Martonne (E.). — Géographie physique de la France. Armand Colin, Paris, 1943.
(5) Dumans (M.). — Contribution à l'étude de la navigation en Basse-Seine. Études Normandes. 3e trimestre.
(6) Jouis (Edg.). — Les couches tourbeuses de la Basse Vallée de Seine. Association française pour l'étude du sol. nº 3, mars 1958.
(7) Jouis (Edg.), Lecacheux (Th.) et Cauchy (Fr.). — Étude granulométrique sur les terrains du méandre de Duclair. Revue des Sociétés Savantes de Haute-Normandie. (Sciences) nº 9, 1958.
(8) Liger (J.). — Études sur la végétation des Falaises calcaires de la Basse-Seine. Bulletin de la Société des Amis des Sciences Naturelles et du Muséum de Rouen. p. 17 à 54, 195p.
(9) Sanson (J.). — Le climat de la Normandie. Études Normandes, Rouen, nº 30 et 33, 1954.
(10) Sauvage (J.). — Palynologie et pétrographie de tourbes et de sédiments de la Cuvette Parisienne et des Ardennes. Mémoires du Service de la Carte Géologique d'Alsace et de Lorraine, nº 12, 1954.
(11) Sion (J.). — Les paysans de la Normandie Orientale. Armand Colin Éditeur. 1903.

631. 875 : 635. 82.

ENQUÊTE SUR LA COMPOSITION DES FUMIERS PROVENANT DE CHAMPIGNONNIÈRES

PAR

S. TROCMÉ [1]

Station centrale d'Agronomie, Versailles

PLAN DU MÉMOIRE

Introduction.

Rappel des conditions de production des champignons, notamment en caisses.

Exécution de l'enquête.

Résultats.

Composition globale (humidité, gobetage, fumier), densité apparente, azote, acide phosphorique, potasse, matières organiques.

Composition rapportée à l'unité de volume.

Discussions.

Essai de bilan des éléments.

Conclusions.

INTRODUCTION

On a pu lire récemment dans ces *Annales* (2) les résultats de l'enquête menée par E. JOUIS et E. HANGARD sur la composition des fumiers français. Les fumiers provenant de champignonnières, désignés couramment sous le nom de « fumiers de champignons » ou de « corps de meules », n'étaient pas compris dans cette enquête ; ils ne représentent à vrai dire que peu de chose vis-à-vis de la production totale de fumier de ferme : alors que celle-ci est estimée à quelque 125 millions de tonnes par an, la quantité totale de fumier de champignonnières ne dépasse guère

(1) Avec la collaboration technique de Mlle C. Duhauvelle.
(2) *Ann. Agr.* 1957, n° 6.

400 000 tonnes. Il a paru cependant intéressant, sur l'initiative de la Chambre d'Agriculture de la Seine, de chercher à préciser les données un peu insuffisantes dont on dispose actuellement sur la composition de ces fumiers, étant donné que les utilisateurs,qui ne sont pas eux-mêmes producteurs de fumier, ne peuvent préjuger de la richesse d'un produit qu'ils n'ont pas fabriqué. Un point en particulier était mal connu : dans quelle mesure les fumiers provenant de caisses différent-ils de ceux provenant de meules?

Il n'est peut-être pas inutile de rappeler ici succinctement en quoi se différencient ces deux techniques de production : meules, technique classique et encore largement utilisée ; caisses, technique ayant fait son apparition en France depuis quelques années, et progressant au détriment de la première.

Dans le travail en caisses, le travail du fumier comporte schématiquement deux parties :

— une première partie qui rappelle celle du travail en meules, c'est-à-dire fermentation en tas, entrecoupée de retournes.

— une seconde partie s'accomplissant dans des conditions assez nettement définies : le fumier est « monté » dans des caisses en bois (de 0,5 m² en général), sur une épaisseur de 12 à 15 cm, et soumis à ce qu'on appelle improprement une « pasteurisation », par maintien pendant 24 à 48 heures à une température voisine de 55° en atmosphère très aérée et saturée d'humidité. Du moins ces conditions sont-elles adoptées en général actuellement, sans que l'on puisse affirmer qu'elles représentent les conditions optima. De nombreux parasites sont ainsi détruits, de façon plus régulière que lorsque le travail du fumier s'effectue uniquement en tas. Cette « pasteurisation » représente en outre une véritable fermentation contrôlée.

Les caisses sont ensuite lardées (ensemencées de blanc) et soumises à l'incubation pendant 3 semaines environ à une température constante de l'ordre de 20°, puis gobetées ; la récolte se fait en caves (carrières) comme pour des meules. Les rendements, rapportés à un même poids de fumier initial, sont environ 3 fois plus élevés en caisses qu'en meules.

On peut supposer que les fumiers livrés à l'agriculture une fois la production de champignons terminée ne présentent pas la même composition suivant qu'ils proviennent de meules ou de caisses [1], étant donné notamment :

— les différences dans la marche des fermentations,

— les différences dans les additions d'engrais,

— les possibilités supplémentaires de pertes d'azote dans l'atmosphère au cours de la pasteurisation,

[1] Si le fumier provenant de meules est souvent désigné sous le nom de corps de meule, l'usage n'a pas encore consacré d'expression pour différencier le fumier provenant de caisses.

— les différences dans les proportions relatives et la nature des gobetages,

— les différences de rendements en champignons, donc d'exportations d'éléments.

Ces divers points seront repris et discutés plus loin.

Le prélèvement des échantillons de fumiers soumis à l'analyse pour l'enquête a été effectué sur les fumiers tels qu'ils sont le plus souvent livrés pour utilisation agricole ou horticole, c'est-à-dire fumier et gobetage en mélange, sans séjour prolongé en carrières ou à l'extérieur une fois la production terminée. Quelques échantillons de fumiers conservés dans des conditions particulières ont été également examinés. Certains échantillons ont été prélevés après élimination de la majeure partie du gobetage, comme cela se pratique parfois, essentiellement sur fumiers de meules ; on conçoit en effet que la séparation de la couche de gobetage et du fumier sous-jacent se fasse plus malaisément dans le cas de caisses.

La plupart des prélèvements ont été effectués au cours du printemps 1958, c'est-à-dire qu'ils correspondaient à des fumiers travaillés en hiver. Des prélèvements effectués en automne n'ont pas mis en évidence de différences suffisamment apparentes pour qu'il y ait lieu d'en tenir compte. Il n'est pas exclu cependant que, suivant la saison, la composition des fumiers varie légèrement.

L'enquête a été limitée aux fumiers travaillés dans la Région Parisienne (Seine, Seine et Oise, Oise), qui représente, avec la moyenne vallée de la Loire et le bassin Aquitain, une des trois grandes régions productrices de champignons.Au moment de chaque prélèvement était recueilli un ensemble de renseignements sur les conditions de culture : nature et provenance des fumiers utilisés, additions d'engrais ou d'autres produits, conduite de la fermentation et temps de séjour sur forme, pertes éventuelles de purin, quantité et nature du gobetage, rendement en champignons, poids ou volume de fumier final par rapport au fumier d'origine, etc. 36 fumiers ont été analysés, dont 27 de cultures en meules et 9 de cultures en caisses, nombres comparables à ceux qui ont permis à E. JOUIS et E. HANGARD d'établir la composition moyenne des diverses catégories de fumiers de ferme [1].

Les analyses ont porté sur l'appréciation de la densité, la détermination de l'humidité, de la teneur en calcaire (et également de la teneur en calcaire du gobetage, d'où l'on a déduit la proportion de terre de gobetage, dans les divers échantillons), la détermination des teneurs en azote, acide phosphorique et potasse totaux, de la teneur en matières organiques (pour certains échantillons peu calcaires). Les techniques utilisées ont été sensiblement les mêmes que celles indiquées par E. JOUIS et E. HANGARD, à quelques différences près : la dessiccation a été effectuée sans addition

[1] *Ann. Agr. loc. cit.*

d'acide oxalique, étant donné la présence très générale de calcaire dans les échantillons, ne renfermant plus d'ailleurs que de faibles quantités d'azote minéral ; la potasse et l'acide phosphorique ont été dosés sur les cendres (après addition éventuelle d'acétate de calcium). On s'est assuré que la présence de carbonate de calcium en quantités souvent élevées ne rendait pas nécessaires des modifications notables des techniques de dosage. Les résultats analytiques sur échantillons prélevés sans gobetage se sont d'ailleurs montrés en accord avec ceux obtenus sur les mêmes fumiers prélevés avec gobetage.

RÉSULTATS

A. — Composition moyenne globale (voir tableau I)

La composition moyenne globale des corps de meule s'est établie à :

Humidité.....	397 ‰	{ 397 kg par tonne)
Gobetage.....	385 ‰	{ Le fumier est obtenu par différence, c'est-à-dire éventuellement avec quelques souillures de matières terreuses. Il comprend également le mycélium de champignon restant.
Fumier.....	218 ‰	

Les extrêmes étaient de 235 et 531 pour l'humidité (60 % entre 350 et 450), 197 et 595 pour le gobetage (60 % entre 240 et 430), 76 et 377 pour le fumier (60 % entre 130 et 230).

Pour les fumiers « dégobetés », on a obtenu en moyenne :

Humidité.....	548 pour mille
Gobetage.....	51 «
Fumier.....	401 «

La capacité de rétention d'eau des fumiers étant plus élevée que celle des gobetages, il existe une corrélation inverse, assez lâche, entre le taux d'humidité et le taux de gobetage.

Les fumiers de caisses sont en moyenne un peu plus humides que ceux de meules :

Humidité.....	525 pour mille	
Gobetage.....	286 »	{ tourbe du gobetage non comprise
Fumier.....	189 »	{ par différence, c'est-à-dire éventuellement avec la tourbe du gobetage.

Les extrêmes étaient de 328 et 717 pour l'humidité, 125 à 415 pour le gobetage, 110 à 257 pour le fumier.

Le rapport fumier/gobetage est ici plus élevé que dans le cas des meules, ce qui explique en partie que ces fumiers soient un peu plus humides. De plus, les producteurs en caisses ajoutent assez généralement

TABLEAU I. — *Pour mille.*

	Meules					Caisses					Meules dégobetées				
	Humidité	CO_3Ca	N	P_2O_5	K_2O	Humidité	CO_3Ca	N	P_2O_5	K_2O	Humidité	CO_3Ca	N	P_2O_5	K_2O
Nombre de résultats	21	21	21	21	21	8	8	8	8	8	3	3	3	3	3
Moyenne	397	327 (1)	6,4	2,8	6,2	525	240	5,4	2,3	4,3	548	39	11,5	4,5	12,1
Valeurs extrêmes	235	168	3,0	1,3	2,2	328	105	3,2	1,1	1,75					
	531	516	12,1	4,8	12,7	717	348	7,4	3,9	6,5					
Rapport des extrêmes	2,3	3,1	4,0	3,7	5,8	2,2	3,3	2,3	3,5	3,4					

(1) Non compris l'échantillon gobeté au gypse.

TABLEAU II. — *Pour mille de fumier sec, sans gobetage.*

	Meules			Caisses		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
Nombre de résultats	21	21	21	8	8	8
Moyenne	28,8	12,6	27,0	28,8	11,9	22,7
Valeurs extrêmes	18,6	8,6	11,6	19,2	8,0	11,0
	36,0	19,8	40,7	39,4	15,1	33,6
Rapport des extrêmes	1,9	2,3	3,5	2,0	1,9	3,0

TABLEAU III. — *kg par m³.*

	Meules	Caisses	Meules dégobetées
CO_3Ca	157	125	10
N	3,1	2,8	3,5
P_2O_5	1,3	1,2	1,4
K_2O	3,0	2,2	3,6

de la tourbe à leur gobetage calcaire, dans la proportion moyenne de 10 % du total en volume (parfois 20 %). Pour un mélange, à un même taux d'humidité, de 9 parties de terre de gobetage de densité 1,3 à 1 partie de tourbe de densité 0,8, le rapport tourbe/gobetage, en poids, est d'environ 0,7. Dans ces conditions, on a en moyenne, par tonne de produit, 20 kg de tourbe, comptée ici avec le fumier.

L'incorporation de tourbe dans le gobetage est beaucoup moins pratiquée par les producteurs travaillant en meules.

Il apparaît en définitive que :

a) Les proportions de gobetage sont très variables (le rapport du gobetage à la somme gobetage + fumier de meule — secs — varie de 37 à 83 p. 100) ; la dimension des meules et l'épaisseur des gobetages varient en effet avec les exploitations. Cela entraîne nécessairement de larges variations dans les richesses en éléments fertilisants.

b) Ainsi qu'on l'a souvent souligné, les fumiers provenant de champignonnières sont moins humides que les fumiers de ferme (fumiers de moutons mis à part). L'humidité moyenne des fumiers mixtes de ferme se situe en effet aux environs de 800 pour mille (1). Une fois dégobetés, les fumiers de champignonnières renferment donc, pour un même poids, beaucoup plus de matière sèche fumier que les fumiers de ferme. Mais les fumiers avec leur gobetage en renferment en moyenne une quantité du même ordre.

c) Les gobetages utilisés dans la région parisienne sont des calcaires extraits de la carrière même du champignonniste ; ils renferment en moyenne 85 p. 100 (75 à 95 p. 100) de carbonates (exprimés en CO_3Ca ; la proportion de CO_3Mg excède rarement 1 p. 100. Certains auteurs ont considéré que la présence de magnésium dans la terre de gobetage était un facteur défavorable, mais il n'apparaît pas à l'heure actuelle que ce point de vue soit justifié (2)). Les gobetages employés dans la vallée de la Loire sont en général un peu moins calcaires (59 p. 100 de CO_3Ca — de 47 à 75 p. 100, d'après l'analyse de 12 échantillons). Ils ont une hygroscopicité et une capacité de rétention d'eau un peu plus élevées que ceux de la région parisienne, mais il n'y a pas lieu de penser qu'il en résulte des différences notables dans la composition globale de fumiers.

On sait que ces gobetages calcaires peuvent être considérés comme de bons amendements (3). L'application d'une tonne de fumier de champignonnière représente en moyenne l'équivalent de 300 kg environ d'un calcaire pur, ce qui peut être considéré comme une plus-value. En fait, les fumiers provenant des champignonnières sont souvent utilisés à proximité de celles-ci, c'est-à-dire en terrains eux-mêmes calcaires ; l'apport

(1) JOUIS (E.) et HANGARD (E.) — *loc. cit.*
(2) LAMBERT (E. B.) et AYERS (I.), Plant Disease Reporter, **39**, 1955.
(3) BOISCHOT (P.), MARCEL (M.) et HEBERT (J.) — *C. R. Ac. Agr.* 1946, p. 40.

de calcaire correspond alors à un gaspillage qui peut être regrettable, mais auquel il est vraisemblablement difficile de remédier. Cet apport est cependant à éviter pour les cultures ne supportant pas un taux élevé de calcaire (poiriers sur cognassier notamment, surtout s'ils sont à la limite de la chlorose, le calcaire apporté par le fumier risquant d'être plus actif que celui préexistant dans le sol). Il faut alors leur préférer le fumier dégobeté.

Un des corps de meule analysés avait un gobetage constitué par un mélange de gypse (75 p. 100) et de terre végétale (25 p. 100). En fait, l'emploi de gypse comme gobetage, qui permet d'obtenir des champignons de meilleure présentation, est peu pratiqué.

B. — Densité apparente

Comme l'ont fait remarquer E. JOUIS et E. HANGARD, les chiffres de densités ne correspondent qu'à des ordres de grandeur permettant un classement des fumiers entre eux.

Dans le cas présent, les déterminations de densités n'ont pu être effectuées dans des conditions satisfaisantes que sur 21 échantillons (16 de meule, dont 3 sans leur gobetage, 5 de caisse). Pour les fumiers provenant de meules, nous avons trouvé une densité apparente moyenne de 0,48 (480 kg par m³), avec des extrêmes de 0,375 et 0,62, soit une variation de 1 à 1,65. Cette densité est donc inférieure à celle des fumiers de ferme, laquelle se situe en général entre 0,5 et 0,8 (les fumiers les plus humides étant les plus denses), et n'est inférieure à 0,5 que pour des fumiers assez secs. Pour les fumiers dégobetés, on a obtenu une densité moyenne de 0,3 correspondant à celle de fumiers de ferme très secs, exceptionnels.

Le corps de meule est en moyenne constitué par 3 m³ de gobetage pour 17 m³ de fumier. On a ainsi pour 1 m³ de corps de meule à 40 p. 100 de gobetage :

0,85 m³ de fumier à 350 kg le m³	=	300 kg
0,15 m³ de gobetage à 1 300 kg le m³	=	195 kg
		495 kg

Le fumier vendu est en général un peu moins tassé que les meules elles-mêmes.

La densité des fumiers provenant de caisses est apparue comme un peu plus élevée que celle des corps de meule : 0,52 (de 0,42 à 0,60) sans que l'on puisse attacher de signification à la différence observée. Les caisses reçoivent le fumier sur 12 cm d'épaisseur en moyenne, avec 2 cm de gobetage, soit, pour 1 m³ :

0,86 m³ de fumier à 350 kg le m³	=	300 kg
0,14 m³ de gobetage à 1 300 kg le m³	=	182 kg
		482 kg

C. — Azote, acide phosphorique, potasse

Les résultats sont indiqués dans les tableaux I et II ; les moyennes obtenues sont du même ordre que celles déterminées précédemment par P. COURTIEUX et G. CHAPUIS (1), concernant, semble-t-il, des corps de meule sans gobetage. On peut faire en outre les observations suivantes :

1° On constate que la composition des fumiers, comme on pouvait le prévoir, est sujette à de larges variations. Les variations sont beaucoup plus accusées entre les fumiers humides avec leur gobetage qu'entre les fumiers secs sans gobetage. D'une façon générale, les fumiers dont la teneur en gobetage est élevée sont pauvres en N, P_2O_5 et K_2O, et inversement, sans qu'il existe une corrélation nettement accusée. Certains fumiers, que l'on n'a pas fait intervenir pour l'établissement des moyennes, avaient séjourné à l'extérieur un temps prolongé, ce qui a conduit à des taux de K_2O assez faibles.

Comme chez les fumiers de ferme, il existe une corrélation positive entre la teneur en N et la teneur en P_2O_5 des fumiers secs, assez lâche dans le cas présent, ainsi qu'entre les teneurs en N et K_2O (plus lâche encore que la précédente).

2° Les fumiers de meule et les fumiers de caisse ont des compositions assez voisines. Les fumiers de caisse apparaissent cependant comme un peu plus pauvres, notamment en K_2O, élément pour lequel la probabilité de la différence est de 95 p. 100. On peut rechercher dans quelle mesure un essai de bilan des éléments permet d'étayer ces conclusions.

1. **Meules.** — Les producteurs considèrent qu'une tonne de fumier initial (en général, fumier de ferme mélangé à fumier de haras) donne en moyenne 800 kg de corps de meule, gobetage compris. Au cours de la fermentation sur forme, le fumier est toujours additionné d'engrais azoté : dans la région parisienne, sulfate d'ammoniaque apporté en 1 ou 2 fois, sur la base moyenne de 5 kg par tonne de fumier (de 3,5 à 7,5 kg suivant les producteurs), soit 1 kg N par tonne de fumier. On n'ajoute pas d'engrais phosphaté ou potassique. 1 tonne de fumier donne en moyenne 50 kg de champignons, ce qui correspond à un prélèvement moyen de 0,3 kg N ; 0,15 kg P_2O_5 ; 0,25 kg K_2O.

Le bilan approximatif peut dès lors s'établir ainsi, en kg d'éléments fertilisants :

	N	P_2O_5	K_2O
1 tonne de fumier initial.....	5	2,5	5,5
Engrais	1		
	6		
Prélèvements des champignons.....	— 0,3	— 0,15	— 0,25
	5,7	2,35	5,25
800 kg de corps de meule — (d'après le tableau I).....	5,1	2,32	5,2

(1) *Bull. Féd. des Producteurs de champignons*, 1951, n° 14.

ce qui correspondrait à une perte en cours de fabrication de 0,6 kg N par tonne, et à des pertes assez faibles en P_2O_5 et K_2O.

2. **Caisses.** — 1 tonne de fumier initial (fumier d'écuries de courses le plus souvent, sans doute un peu moins dense que le fumier utilisé pour les meules) donne après culture environ 1 tonne de fumier (gobetage compris). Les additions d'engrais azotés sont beaucoup plus généreuses que dans la production en meules : en moyenne 3 kg N par tonne (2 à 4,5) sous forme de sulfate d'ammoniaque et d'urée. Certains producteurs ajoutent en outre du superphosphate (5 kg par tonne). L'addition d'engrais potassiques n'est pas pratiquée. Exceptionnellement, on apporte un mélange d'oligoéléments, mais en quantité telle que la teneur du fumier n'en est guère affectée.

Comme indiqué plus haut, 1 tonne de fumier donnera environ 150 kg de champignons.

Le bilan en kg d'éléments s'établira ainsi :

	N	P_2O_5	K_2O
1 tonne de fumier.....	4 — 5	2,5	5,5
Engrais	4 — 3	0 — 1	0
Tourbe.....	0,3	0,01	0,03
	8,3	2,5 — 3,5	5,5
Prélèvements des champignons	— 0,9	— 0,45	— 0,75
	7,4	2 — 3	4,75
1 tonne de fumier de caisse (d'après le tableau 1).....	5,4	2,3	4,3

ce qui correspondrait à des pertes de 2 kg d'azote par tonne, et à des pertes assez faibles en P_2O_5 et K_2O.

L'ensemble de ces données comporte une bonne part d'approximation, puisque notamment la composition initiale du fumier est sujette à de larges variations.

Elles permettent cependant les remarques suivantes :

a) Il est concevable que les fumiers de caisse aient une composition assez voisine des fumiers de meule; on peut admettre cependant qu'ils sont parfois un peu plus pauvres en potasse, dont les prélèvements plus élevés ne sont pas compensés par des apports d'engrais.

b) On insiste souvent sur le fait que les prélèvements des champignons en éléments fertilisants sont faibles par rapport à ce que renferme le fumier ; effectivement, les pourcentages de ces prélèvements sont, d'après les moyennes données ci-dessus, :

Pour les meules	N.....	5,5 %
	P_2O_5.....	6 %
	K_2O.....	5 %
Pour les caisses	N.....	14,5 %
	P_2O_5.....	16 %
	K_2O.....	15 %

Les pourcentages sont nettement plus élevés dans le cas des caisses, ce qui explique en partie que les fumiers soient un peu plus pauvres, mais,

même dans ce cas, il n'apparaît pas que l'arrêt de la production soit dû à un épuisement en éléments N, P ou K. On ne saurait non plus considérer que les fumiers de caisse sont excessivement appauvris par les rendements élevés qu'ils ont fournis.

3° Les teneurs moyennes en N, P_2O_5, K_2O des fumiers de champignonnières restent du même ordre de grandeur que celles des fumiers mixtes de ferme (5,5-3,5-7 %) ou des fumiers de ferme dans leur ensemble (5-3-6 p. 100). Les fumiers sans gobetage sont nettement plus riches en tous éléments.

D. — Matières organiques

Sur un nombre réduit d'échantillons de corps de meule, ne renfermant pas de tourbe, et à teneur en calcaire faible, on a déterminé par perte au feu une teneur moyenne en matières organiques de 660 pour mille de fumier sec (de 610 à 710) avec un rapport matière organique/azote de 23, ce qui correspond à des fumiers faits. Si l'on admet que ce chiffre est représentatif pour l'ensemble des fumiers (ce qui n'a pu être vérifié), on voit qu'une tonne de fumier de champignonnière représente en moyenne 125 à 150 kg de matières organiques (comme 1 tonne de fumier de ferme), et près de 300 kg s'il s'agit de fumiers dégobetés.

E. — Composition rapportée à l'unité de volume

Le tableau III montre que les quantités moyennes d'éléments fertilisants renfermées par un même volume de fumier de champignonnière sont en définitive assez voisines, qu'il s'agisse de fumiers de meules, de fumiers de caisses, ou de fumiers dégobetés, l'avantage étant cependant en faveur de ces derniers. Mais un même volume de fumier de ferme, plus dense (0,6 à 0,8), en apportera en général un peu plus.

On fait souvent remarquer que les fumiers de champignonnières, et notamment les fumiers dégobetés, présentent l'avantage d'être particulièrement secs, donc particulièrement riches si l'on rapporte leur teneur en éléments fertilisants à l'unité de poids. Mais cet avantage s'atténue nettement si l'on rapporte les teneurs à l'unité de volume, les fumiers secs étant beaucoup moins denses que les fumiers humides.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Les teneurs en calcaire, en éléments fertilisants N P K et en matières organiques des fumiers provenant de champignonnières, qu'il s'agisse de production en meules ou en caisses, varient suivant leur origine, et la composition d'un échantillon déterminé est évidemment susceptible de s'écarter notablement des moyennes indiquées.

Les fumiers de champignonnières renferment en général une proportion élevée de calcaire (300 p. 1000 en moyenne), notamment ceux de la région parisienne étudiés ici, dont les gobetages sont très riches en calcaire. Ce calcaire doit être considéré comme un amendement actif.

On admet souvent que les fumiers de champignonnières doivent être riches parce qu'ils sont relativement secs. Cela est exact si l'on considère des fumiers dégobetés, pour lesquels on peut adopter comme teneurs moyennes, N, P_2O_5, K_2O p. 1000, 11-5-11. De tels fumiers n'ont par contre qu'une faible densité. On conçoit que la présence de gobetage presqu'exclusivement calcaire en quantités souvent élevées abaisse notablement ces moyennes. Les teneurs moyennes des corps de meule en éléments fertilisants s'abaissent alors à 6,5-3-6 p. 1000 N, P_2O_5, K_2O ; ces teneurs sont assez voisines de celles des fumiers mixtes de ferme (moyenne 5,5-3,5-7 p. 1000) ou des fumiers de ferme dans leur ensemble (5-3-6p.1000). Les fumiers provenant de caisses sont sans doute un peu plus pauvres en éléments fertilisants, notamment en potasse.

RÉSUMÉ

Étude analytique de fumiers provenant de champignonnières (cultures en meules ou en caisses). Ces fumiers sont dans l'ensemble moins humides que les fumiers de ferme, mais renferment en général une proportion élevée de calcaire.

La teneur moyenne en éléments fertilisants des corps de meule (6,5 — 3 — 6 p. 1 000. N — P_2O_5 — K_2O) est apparuec omme assez voisine de celle des fumiers de ferme. Ces moyennes sont un peu plus faibles chez les fumiers provenant de caisses, notamment en potasse, en accord avec les conditions de fabrication de ces fumiers.

Une fois dégobetés, les fumiers de champignonnières sont particulièrement riches en éléments fertilisants (11 — 5 — 11), du fait de leur relative siccité. De tels fumiers n'ont par contre qu'une faible densité.

SUMMARY

Survey of the composition of manure from mushroom beds.

Manures from mushroom beds (hotbeds or trays) were analysed. These manures are generally less moist, but contain more lime, than farmyard manure.

The average nutrient contents of hotbeds (6,5 p. 1000 N, 3 p. 1000 P_2O_5, 6 p. 1000 K_2O) were rather similar to those of farmyard manure. In tray-cultures of mushrooms, the nutrient content, especially of potassium, was lower than in farmyard manure.

Manure with cosing soil removed is very high in nutrients (11-5-11), due to its low moisture content, but possesses a low density.

ZUSAMMENFASSUNG

Untersuchung über die Zusammensetzung von Misterden aus Champignonzuchtereien

Analytische Erforschungen von Misterden welche von Champignonzüchtereien herrühren (Beet-oder Kistenanlagen). Dieselben besitzen im allgemeinen einen niedrigeren Wassergehalt als Stallmist, dagegen aber gewöhnlich einen höheren Kalkgehalt.

Der Mittelgehalt an Nährstoffen der Beetumkleidung (6,5-3-6%N-P_2O_5-K_2O) erscheint denen von Stallmisten sehr nahe. Diese Mittelwerte sind ein wenig geringer, besonders an Kali, für Misterden welche aus Kistenanlagen stammen, dies in völliger Uebereinstimmung ihrer Herstellungsbedingungen.

Einmal abgehoben, so sind die Misterden aus Champignonzüchtereien, dank ihrer Trockenheit, besonders reichhaltig an Nährstoffen (11-5-11). Hingegen besitzen solche Misterden nur ein geringes Volumengewicht.

Анкета относительно состава навозов полученных от грибоводств.

С. ТРОКМЭ. (Версальская Агрономическая Станция.)

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Аналитическое изучение навозов происходящих от грибоводств (культуры на кучах или культуры в ящиках). В общем, эти навозы менее влажны, чем обычные навозы ферм, но обычно они содержат значительное количество известняка.

Среднее содержание куч в питательных элементах (N-P_2O_5-K_2O 6,5-3-6 %) достаточно похоже на состав обычного хозяйственного навоза. Содержание ящичных навозов несколько более слабо, в особенности в калии, соласно условиям приготовления этих навозов.

Когда эти навозы вынуты, они особенно богаты питательными элементами (11-5-11), так как они сравнительно сухи. Напротив, их плотность незначительна.

TABLE DES MATIÈRES DE L'ANNÉE 1959

Mémoires originaux

Blanchet (R.). — Énergie d'adsorption des ions minéraux par les colloïdes du sol et nutrition minérale des plantes (1re partie) 5
Blanchet (R.). — Énergie d'adsorption des ions minéraux par les colloïdes du sol et nutrition minérale des plantes (2e partie) 125
Blanchet (R.). — Énergie d'adsorption des ions minéraux par les colloïdes du sol et nutrition minérale des plantes (3e partie) 267
Birot (P.), Caillère (S.), Henin (S.). — Étude du problème des premiers stades de l'altération de quelques roches 257
Collier (D.) et Robelin (M.). — Contribution à l'étude de la dynamique de l'eau et des substances chimiques dans les sols argilo-calcaires de Limagne. — Résultats de quatre années d'observations lysimétriques 415
Coppenet (M.). — Le manganèse dans les sols de Bretagne et ses relations avec la croissance des végétaux 155
Dejou (J.). — Étude comparative des phénomènes d'altération sur granits porphyroïdes de Lormes et sur anatéxites à cordiérite en Morvan Nord et des sols qui en dérivent 101
Ferry (P.), Blachère (H.), Obaton (M.). — Un milieu de culture synthétique pour Rhizobium Meliloti 219
Gachon (L.). — Diagnostic foliaire des céréales et détermination rationnelle de la fumure 309
Gadet (A.), Soubies (L.), Fourcassie (F.). — Recherches sur les effets toxiques du Biuret et sur l'évolution de ce composé dans les sols 609
Geze (B.). — La notion d'âge du sol. Son application à quelques exemples régionaux 237
Guennelon (R.). — Analyses des silicates d'alumine (minéraux argileux). Possibilités d'utilisation des complexones 77
Hamy (A.). — Carence en acide phosphorique et concentration en pigments solubles 455
Jouis (E.) et Lecacheux (M. Th.). — Recherches sur des méthodes de dosage pratique des oligoéléments, cuivre, zinc, manganèse dans les plantes et dans les sols en vue d'applications de routine dans les laboratoires agricoles 349
Jouis (E.) et Lecacheux (M. Th.). — Contribution à l'étude des terroirs de la vallée de la Basse-Seine 661
Juste (C.), Delmas (J.). — Emploi de l'acide ascorbique dans le dosage colorimétrique de l'acide phosphorique assimilable des sols 343

Lefèvre (G.) et Lefèvre (P.). — Essai de tri mécanographique sur les éléments de l'analyse physique des sols du Plateau Picard de l'Oise 53

Lefèvre (G.) et Hiroux (G.). — Rendement et composition de quelques espèces d'herbes au cours de leur premier cycle de Végétation (Influence de la fumure azotée en 1958) 327

Lefèvre (G.) et Hiroux (G.). — Essai sur l'influence de la date d'apport des engrais azotés sur le rendement des betteraves sucrières (Développement végétatif et marche de l'adsorption d'azote) .. 477

Lossaint (P.). — Étude expérimentale de la mobilisation en fer des sols sous l'influence des litières forestières.

1re partie 369

2e partie 493

Obaton (M.), Blachère (H.), Ferry (P.). — L'inoculation de la luzerne. 69

Riedel (C. E.). — Les sols alluviaux maritimes : Mer du Nord ; Manche ; Océan Atlantique 543

Trocme (S.). — Enquête sur la composition des fumiers provenant de champignonnières 713

BIBLIOGRAPHIE

ALLERTON (F.). — La culture des tomates 601
BASSHAM (J. A.) et CALVIN (M.). — Le cycle du carbone dans la photosynthèse 606
HARVEY (N.). — Étude de l'organisation du travail de la ferme .. 603
KIDNER (A. W.). — L'asperge 601
KOHNTE (H.) et BERTRAND (A. R.). — Conservation du sol 607
MARSHALL (T. S.). — Relations entre l'eau et le sol 603
PERUCHON DE BROCHARD (J.) et TRIACA (N.). — Table de composition des aliments des animaux en acides aminés 605
RICHARD (H.). — Productivité de la terre 599
ROBERT (P.). — L'agriculture en Dordogne 600
WILLIAMS (R. D.). — Oligoéléments, leurs effets sur la croissance et la composition des plantes de prairie 607

Bibliographie et écologie en Australie 606
Climatologie et microclimatologie 601
Dictionnaire technique du machinisme agricole 602
Les cultures légumières du Vaucluse 601
Mises au point de chimie analytique et appliquée et d'analyse bromatologique 605
Monographies agricoles départementales 600
Rôle des phosphates dans les sols, les plantes et les animaux aux Indes 604

TABLE ALPHABÉTIQUE

Allerton (F.) 601
Bassham (S. A.) et Calvin (M.) 606
BLANCHET (R.) 5, 125, 267
BIROT (P.), CAILLÈRE (S.), HENIN (S.) 257
COLLIER (D.) et ROBELIN (M.) 415
COPPENET (M.) 155
DEJOU (J.) 101
FERRY (P.), BLACHÈRE (H.) et OBATON (M.) 219
GACHON (L.) 309
GADET (R.), SOUBIES (L.) et FOURCASSIE (F.) 609
GEZE (B.) 237
GUENNELON (R.) 77
HAMY (A.) 455
Harvey (N.) 603
JOUIS (E.) et LECHACHEUX (M. Th.) 349, 661
JUSTE (C.) et DELMAS (J.) 343
Kidner (A. W.) 601
Kohnte (H.) et Bertrand (A. R.) 607
LEFÈVRE (G.) et LEFÈVRE (P.) 53
LEFÈVRE (G.) et HIROUX (G.) 327, 477
LOSSAINT (P.) 369, 493
Marshall (T. S.) 603
OBATON (M.), BLACHÈRE (H.) et FERRY (P.) 69
Peruchon de Brochard (J.) et Triaca 605
Richard (H.) 599
RIEDEL (C. E.) 543
Robert (P.) 600
TROCME (S.) 713
Williams (R. D.) 607

Le Directeur-Gérant : B. LACLAVIÈRE.

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 25-2-1960

Dépôt légal: 1er trimestre 1960 *N° d'impression: 721*

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE — MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE

ANNALES DE L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

SÉRIE A

ANNALES AGRONOMIQUES

ÉTUDE COMPARATIVE DES PHÉNOMÈNES D'ALTÉRATION SUR GRANITE PORPHYROÏDE DE LORMES ET SUR ANATEXITES A CORDIÉRITE DU MORVAN-NORD ET LES SOLS QUI EN DÉRIVENT

par Jean DEJOU

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
7, rue Keppler - Paris

ÉTUDE COMPARATIVE DES PHÉNOMÈNES D'ALTÉRATION SUR GRANITE PORPHYROÏDE DE LORMES ET SUR ANATEXITES A CORDIÉRITE DU MORVAN-NORD ET LES SOLS QUI EN DÉRIVENT

PLAN DU MÉMOIRE

INTRODUCTION

Généralités sur le Morvan-Nord

CHAPITRE PREMIER

Aperçu des travaux ayant pour thème l'altération des roches.
Altération physique.
Altération chimique.
Étude minéralogique de l'altération.
Études expérimentales au laboratoire.

CHAPITRE II

Le granite de Lormes choisi comme terme de comparaison avec les anatexites du Morvan-Nord : Étude pétrographique et Arénisation de ce granite.

CHAPITRE III

Difficultés dans le choix d'une carrière d'arène.
Importance des phénomènes périglaciaires ayant affecté les arènes.

CHAPITRE IV

L'altération du granite porphyroïde de Lormes : coupe de l'Abattoir.
I. — L'altération physique. Étude minéralogique de chaque horizon du profil.
II. — L'altération chimique.

CHAPITRE V

Étude pétrographique des anatexites à cordiérite du Morvan-Nord.
— Composition minéralogique et chimique de ces roches.
— Leur altération physique : rareté des zones d'altération.

CHAPITRE VI

L'altération des anatexites à cordiérite de Chastellux (Yonne).
I. — L'altération physique. — Étude minéralogique des constituants du profil.
II. — L'altération chimique.

Chapitre VII

L'altération des anatexites à cordiérite de Saint-Brancher (Yonne).
Étude minéralogique des constituants et l'altération chimique.

Chapitre VIII

Un exemple d'intense altération chimique très localisée. Cas des anatexites à cordiérite de Moulin de Main près d'Empury (Nièvre).
Étude minéralogique des horizons du profil et examen chimique.

Chapitre IX

Conclusions générales sur l'altération des roches cristallines en Morvan-Nord.
Essais expérimentaux au laboratoire.
Age de l'altération.

Chapitre X

Étude comparée des sols sur granite de Lormes et sur anatexite de la région d'Empury-Chastellux.

I. — Sols sur granite.
II. — Sols sur complexe Anatexite-Roches éruptives.
III. — Comparaisons entre les deux types de sols. Différences de fertilité.

AVANT-PROPOS

L'étude des phénomènes d'altération des roches cristallines du Morvan-Nord me fut proposée comme sujet de thèse par mon Maître, M. le Professeur M. ROQUES, alors que je terminais ma licence à la fin de 1953. Il est pour moi un impérieux devoir, mais combien agréable, de lui exprimer ici ma profonde gratitude pour le dévouement qu'il n'a cessé de me témoigner, d'abord lors de la préparation des certificats de licence où je fus conquis par la valeur de son enseignement, et par la suite, au cours de l'élaboration de ce travail dont il assuma la direction générale, en me faisant profiter de ses conseils et de ses précieux encouragements. Qu'il veuille bien agréer l'hommage de cette étude en témoignage de ma sincère reconnaissance.

Mes remerciements s'adressent ensuite à M. P. LAPADU-HARGUES, Professeur de Minéralogie à la Faculté des Sciences, qui m'a toujours accueilli avec la plus grande amabilité au Laboratoire de Clermont ; c'est lui qui m'a initié aux différentes techniques d'analyses chimiques des roches, et qui ne s'est jamais lassé de me prodiguer son temps et ses conseils avec une bienveillance dont je garde une respectueuse reconnaissance.

M. R. HOVASSE, Professeur de Zoologie, dont j'avais suivi le magistral enseignement, s'est intéressé à mes études au microscope électronique ; il a bien voulu assumer la direction de ma thèse complémentaire et me faire l'honneur d'accepter de faire partie de mon jury. Je lui en exprime ici toute ma gratitude.

Il m'est agréable d'avoir à remercier M. D. COLLIER, Directeur de la Station d'Agronomie de Clermont ; spécialiste de l'étude de l'altération des granites du Massif Central, je me suis souvent référé à ses travaux, absolument fondamentaux en la matière ; il m'a toujours accueilli avec la plus extrême courtoisie à son laboratoire, qu'il a bien voulu mettre à ma disposition, et j'ai largement profité de ses remarques et de ses observations communiquées tant à la Station Agronomique que sur le terrain. De plus, il a accepté très aimablement de faire partie de mon jury. Je le remercie très chaleureusement sans oublier ses collaborateurs et en particulier MM. GACHON et ROBELIN, brillants pédologues avec lesquels nous avons eu de fructueux entretiens, ainsi que Mlle DOPARIS à qui je suis redevable de l'exécution de plusieurs analyses.

Je dois une dette de reconnaissance toute spéciale à M. SAJOT, Ingénieur agricole, chimiste au Laboratoire agricole départemental de la Nièvre ; spécialiste de la chimie agricole, il a bien voulu se charger de la mise au point souvent fort délicate des analyses totales, qu'il effectua avec les soins les plus minutieux et avec un dévouement inlassable ; son mérite est d'autant plus grand qu'il travaille dans des locaux inconfortables, avec un équipement réduit, à telle enseigne que l'on ose à peine parler de laboratoire. Je lui exprime aujourd'hui toute ma gratitude et lui souhaite une brillante réussite pour ses travaux en cours sur les rhyolites et microgranites du Morvan.

Mon camarade J. ANDRE, étudiant à la Faculté de Dijon, m'a beaucoup aidé dans l'exécution du travail analytique et c'est avec lui et M. SAJOT que nous avons prospecté le socle cristallin du Morvan. Observateur remarquable, j'ai tiré le plus grand bienfait de ses réflexions sur le terrain et les contacts quasi-journaliers que nous avons eus ont toujours été les plus fructueux. Je lui adresse mes remerciements les plus sincères et l'assure de toute mon amitié.

Je n'aurais garde d'oublier non plus Mme S. MERIAUX, chargée de recherches à la Station d'Agronomie de Dijon, qui m'a fait profiter toujours avec une extrême affabilité de sa grande expérience de la connaissance des sols et avec qui nous avons confronté à plusieurs reprises nos points de vue au cours de visites dans le Morvan. Je lui exprime ici mes remerciements les plus respectueux.

J'adresse un hommage reconnaissant à Mlle CAILLÉRE, sous-directeur du Muséum, et à M. S. HENIN, directeur du Laboratoire des sols de Versailles, sans lesquels je n'aurais jamais pu mener à bien la détermination des types minéralogiques des argiles, dont ils sont les spécialistes éminents.

M. GEZE, Professeur de Géologie à l'Institut National Agronomique a droit à toute ma reconnaissance, car il a joué un rôle prépondérant dans le choix de mon orientation vers les études pédologiques. Je n'oublierai jamais ses remarquables leçons professées à l'École Nationale d'Agriculture de Montpellier, saisissantes de concision et de clarté. Par la suite, il a toujours suivi avec beaucoup d'intérêt l'avancement de ce mémoire, m'a fait largement bénéficier de ses conseils avertis, tout en m'accordant ses solides encouragements. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde gratitude et de mon respectueux dévouement.

Enfin, je ne saurais terminer sans adresser mes plus vifs remerciements à tous mes camarades du Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Clermont, et en particulier à Mlle Y. CHALEIL et M. THERON qui m'aidèrent dans mes recherches, dans l'exécution des analyses chimiques, et toujours avec le même dévouement infatigable, dont je leur suis très reconnaissant.

INTRODUCTION

LIMITES DU MORVAN-NORD

Le Morvan-Nord constitué uniquement de massifs cristallins primaires, occupe la région d'Avallon et de Quarre-les-Tombes (Yonne), et le canton de Lormes (Nièvre). Il est très bien délimité à l'ouest par la grande faille « séparatrice du Morvan » selon l'expression des géologues locaux, longue de plusieurs dizaines de kilomètres, à peu près rectiligne, et à puissant rejet qui coupe ces terrains cristallins des formations liasiques et jurassiques du Centre Nivernais. Elle se traduit nettement dans la morphologie par l'apparition d'une véritable barrière de terrains éruptifs surplombant la plaine Nivernaise sédimentaire qui bouche l'horizon lorsqu'on parcourt le département d'ouest en est, par exemple de Corbigny à Lormes ou de Chatillon-en-Bazois à Château-Chinon. Quelques belvédères permettent de bonnes observations topographiques ; citons le magnifique panorama de l'église de Lormes, au pied des terrains sédimentaires, et le croisement de la route Lormes-Clamecy et du chemin conduisant à Pouques-Lormes. La faille passe d'ailleurs à quelques mètres de ce point et l'on peut observer dans une prairie voisine, de part et d'autre d'un petit ruisseau, le calcaire jurassique de la bordure orientale du Bassin de Paris et l'arène granitique du Morvan.

Au Nord, la limite de la région est très tranchée sous l'angle géologique car elle coïncide avec la disparition des terrains cristallins qui au-delà d'Avallon cèdent le pas aux assises sédimentaires du Bassin Parisien. De même à l'Est, ils s'enfoncent sous l'Hettangien et le Sinémurien de la partie occidentale de la Bourgogne, transgressifs sur le socle. On rencontre même notamment au hameau « des Plaines » tout près d'Alligny-en-Morvan, à la limite de la Nièvre et de la Côte-d'Or, un îlot de calcaires Hettangiens au sein du granite, représentant l'avancée ultime de la transgression marine.

Si cette ceinture d'assises sédimentaires détermine à l'Ouest, au Nord et à l'Est des limites précises pour le Morvan-Nord, par contre, au Sud, ces dernières sont arbitraires, aucun événement géologique, pas plus que d'accident topographique n'étant intervenu pour le différencier de la partie centrale du massif autour de Château-Chinon.

Nous la fixerons dans cette étude à une ligne partant de Cervon et passant par Vauclaix, Gacogne, St-Brisson, ce qui correspond à peu près au point de contact du granite de Lormes et du microgranite d'Ouroux.

Aperçu géographique et géologique du Morvan-Nord.

Il s'agit d'une pénéplaine fortement marquée par l'action conjuguée des agents de l'érosion. Le relief du pays, assez uniforme, est formé d'une succession de croupes arrondies, garnies de futaies, dont l'altitude oscille entre 350 et 550 m. Toutefois, autour de Dun-les-Places et de St-Brisson, le relief culmine autour de 650 m (à la Roche du Chien). Ce n'est que dans les parties centrale et sud du Morvan, en dehors des limites que nous avons établies plus haut que se rencontrent les points culminants du Morvan : le Mont Prenelay (852 m), important nœud hydrographique, au pied duquel l'Yonne prend sa source en même temps que plusieurs rivières du Bassin de la Loire, et le Mont Beuvray (810 m), auquel se rattachent des souvenirs historiques. Ces collines sont fragmentées par d'étroites vallées orientées Nord-Ouest-Sud-Est, où les rivières telles que la Cure, le Chalaux, le Cousin et le Trinquelain se frayent un passage dans de véritables gorges qui entaillent le massif cristallin.

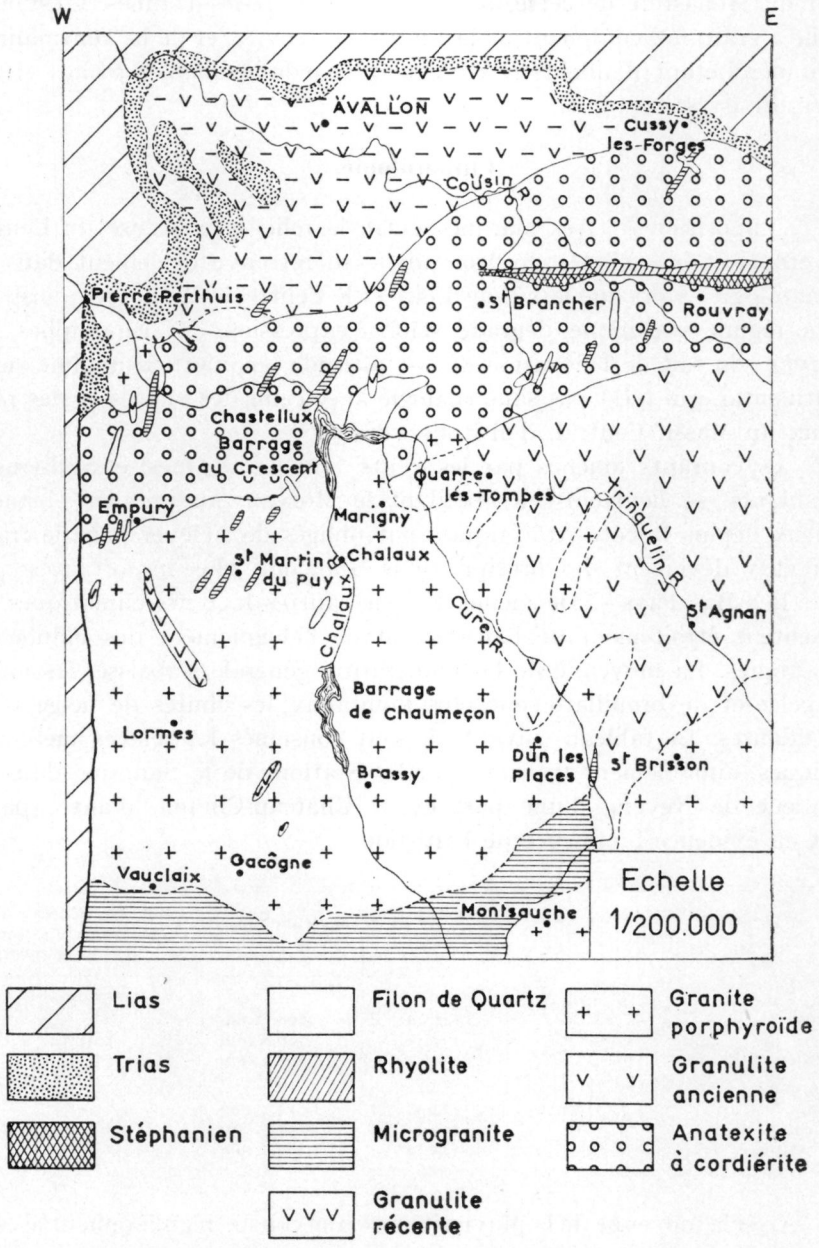
La population du Morvan-Nord tire l'une de ses ressources principales de l'exploitation du manteau forestier, à prédominance de Chêne et de Hêtre. Mais jadis très prospère, cette spéculation semble diminuer aujourd'hui d'importance, car l'agriculture et l'élevage ont réalisé de grands progrès, et complètent harmonieusement l'économie agricole de la région.

Il n'est pas dans mes intentions d'étudier la nature géologique des différents terrains du Morvan-Nord. On voudra bien se rapporter pour cela aux travaux de A. Michel Levy, notamment à son « Aperçu Général sur la Constitution du Morvan », paru en 1879, et à sa « Note sur la formation gneissique du Morvan et Comparaison avec quelques autres régions de la même nature » (1879). On consultera aussi avec profit le récent mémoire de A. Cochet (1953), à qui nous emprunterons les divisions structurales. En allant du Nord au Sud, cet auteur distingue les formations suivantes :

1° La Granulite rose à Biotite et Muscovite d'Avallon, s'étendant de Pierre Perthuis à Cussy-les-Forges.

2° Vient ensuite une frange Sud-Ouest-Nord-Est d'Anatexite à Cordiérite, depuis la grande faille séparatrice jusqu'au-delà du village de St-Brancher dans l'Yonne. Leurs affleurements principaux s'observent à Empury, à Chastellux qui occupe le centre du massif et à 1 km de St-Brancher. Elles sont truffées de nombreux filons de quartz, de microgranite et de digitations granitiques.

3° Au sud de ces anatexites s'étend le grand massif de granite porphyroïde de Lormes, que limitent à l'Ouest la faille du Morvan, et à l'Est



Carte 1. — Carte géologique du Morvan Nord (d'après A. Cochet).

la vallée de la Cure. On l'observe sur les routes Corbigny-Lormes, Lormes-Avallon, à Brassy et à Dun-les-Places.

4° Au-delà de la rive droite de la Cure, nous trouvons enfin un dernier massif : la granulite de la Pierre-qui-Vire, que l'on peut étudier autour du Monastère de cette localité, et à Quarre-les-Tombes. C'est une roche à grain fin, contenant de la Biotite-Muscovite, et de la Tourmaline, ce minéral étant d'ailleurs relativement abondant dans les roches éruptives du pays.

Climatologie.

L'opposition — très marquée entre le relief peu accusé du Centre Nivernais et les collines du Morvan — se retrouve également dans la climatologie. Alors que le Val de Loire et le Centre de la Nièvre jouissent d'un régime océanique dégradé selon l'expression des géographes, le Morvan, du fait de l'élévation de son altitude, acquiert un régime semi continental, qui n'est pas sans analogie avec celui des vallées et des plateaux du Massif Central, d'altitude voisine.

Les courants amenés par les vents humides d'Ouest et Sud-Ouest dominants, se heurtent, en abordant le Morvan, au premier obstacle sérieux depuis la côte Atlantique, sont obligés de s'élever pour le franchir et y déversent des précipitations beaucoup plus importantes que dans le « Bas Pays ». De même, tous les autres facteurs climatiques se ressentent étroitement de l'altitude et de l'éloignement des influences océaniques. La moyenne de la température générale s'abaisse, les jours de gelée et de brouillard sont plus nombreux, les chutes de neige plus abondantes. Le tableau suivant où sont consignés les relevés météorologiques, aimablement transmis par les Stations de la Sangsue, dans la banlieue de Nevers, d'une part et de Château-Chinon, d'autre part, met en évidence l'influence de l'altitude :

Station	Altitude	Moyenne annuelle de la pluviosité	Moyenne générale de la température (30 années d'observations)
Bas Pays :			
Clamecy	147 m	668 mm	
Nevers	200 m	780,8 mm	10°61
Châtillon-en-Bazois	233 m	891,4 mm	
Morvan :			
Lormes	424 m	1 014,3 mm	
Château-Chinon	539 m	1 353,7 mm	9°50
Les Settons	545 m	1 485,5 mm	9°96

Ainsi la moyenne de la pluviosité suit une courbe régulièrement ascendante depuis la Vallée de la Loire jusqu'au Morvan dont certaines localités reçoivent deux fois plus de précipitations. Ce fait mérite d'être retenu car nous verrons par la suite toute l'importance de l'eau dans les phénomènes d'altération des roches.

Année météorologique 1955 dans la Nièvre.

	Janvier		Février		Mars		Avril		Mai	
	Nevers	Château-Chinon	Nevers	Château-Chinon	Nevers	Château-Chinon	Nevers	Château-Chinon	Nevers	Château-Chinon
Température moyenne minima	1°88	0°38	1°13	0°55	— 0°70	— 1°14	2°	3°56	6°01	6°99
Température moyenne maxima	8°27	5°25	8°19	5°50	9°	6°	10°30	12°37	17°03	16°01
Température générale	5°7	2°81	4°65	3°02	4°15	2°4	6°15	7°97	12°70	11°55
Gelée sous abri	10 j	16 j	12 j	15 j	21 j	19 j	10 j	7 j	2 j	2 j
Précipitations	108,6 mm	239 mm	121,6 mm	161,5 mm	57,1 mm	54 mm	0,1 mm	29,6 mm	33,3 mm	51,3 mm
Nombre de jours	17 j	20 j	20 j	22 j	13 j	12 j	4 j	7 j	14 j	12 j
Chute de neige	2 j	4 j		10 j	5 j	5 j	—	1 j	—	—
Sol couvert de neige	3 j	7 j	5 j	9 j	5 j	10 j	—	—	—	—
Insolation totale	—	46 h	68 h	71 h	157 h	140 h	267 h	—	247 h	235 h
Brouillard	4 j	20 j	3 j	18 j	5 j	8 j	2 j	7 j	2 j	7 j
Vent dominant	Ouest	N.-O.		S.-O. à Ouest				Est		Ouest

Année météorologique 1955 dans la Nièvre.

	Juin		Juillet		Août		Septembre		Octobre	
	Nevers	Château-Chinon	Nevers	Château-Chinon	Nevers	Château-Chinon	Nevers	Château-Chinon	Nevers	Château-Chinon
Température moyenne minima	10°5	10°72	13°23	13°83	11°15	13°26	9°69	—	4°4	6°48
Température moyenne maxima	21°7	18°74	25°21	21°80	25°55	21°83	21°89	—	16°18	13°57
Température générale	16°5	14°72	19°22	17°81	18°35	17°54	15°79	—	10°29	10°02
Gelée sous abri	—	—	—	—	—	—	—	—	3 j	
Précipitations	127,4 mm	123,3 mm	52,2 mm	63,4 mm	26,5 mm	28,3 mm	99,6 mm		47,2 mm	45,4 mm
Nombre de jours	14 j	15 j	13 j	16 j	6 j	10 j	—	—	—	—
Chute de neige	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sol couvert de neige	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Insolation totale	232 h	211 h	251 h	235 h	280 h	252 h	191 h	—	179 h	164 h
Brouillard	2 j	8 j	4 j	9 j	1 j	7 j	9 j	—	15 j	9 j
Vent dominant	—	Ouest dominant	—	—	—	N.-E. à Est	—	—	—	O. et E. à N.-E.

Pour marquer encore davantage cette différence climatique entre le « Bas Pays » et le Morvan, nous allons donner des indications météorologiques plus complètes effectuées par les mêmes Stations pour l'année 1955.

But du mémoire.

Tel est, rapidement brossé, le cadre du Morvan-Nord qui va faire l'objet de nos préoccupations. Cependant, nous limiterons notre étude à la partie du pays comprise dans le département de la Nièvre et à ses

Année météorologique 1955 *dans la Nièvre.*

	Novembre		Décembre	
	Nevers	Château-Chinon	Nevers	Château-Chinon
Température moyenne minima...	0°71	2°87	3°04	2°97
Température moyenne maxima...	11°21	9°66	9°	7°52
Température générale.....	5°96	6°26	6°02	5°25
Gelée sous abri.....	16 j	16 j	7 j	6 j
Précipitations.....	34,8 mm	47,5 mm	115,9 mm	156,5 mm
Nombre de jours.....	8 j	8 j	22 j	20 j
Chutes de neige.....	—	1 j	—	—
Sol couvert de neige.....	—	—	—	—
Insolation totale.....	142 h	155 h	18 h	17 h
Brouillard	7 j	5 j	7 j	18 j
Vent dominant	—	Est à Sud-Est	—	—

bordures des départements de l'Yonne et de Côte-d'Or, ce qui correspond à peu près à la frange des Anatexites à Cordiérite, et au massif de granite porphyroïde de Lormes. Le but de ce travail sera de comparer les phénomènes d'altération sur ces deux socles, sous l'angle physique, chimique et minéralogique, et de décrire les sols qui en dérivent.

CHAPITRE PREMIER

APERÇU DES TRAVAUX AYANT POUR THÈME L'ALTÉRATION DES ROCHES CRISTALLINES

L'étude de l'altération des roches cristallines a depuis longtemps retenu l'attention de nombreux chercheurs, tant en France qu'à l'étranger. En effet, ce problème extrêmement complexe dans son ensemble, revêt une importance toute spéciale, non pas seulement scientifique, mais encore économique, puisque les transformations de la roche-mère conduisent en définitive aux sols, supports de toute agriculture. Aussi bien, géologues, géographes et agronomes se sont-ils penchés sur ces questions, en associant souvent leurs connaissances ; d'une façon générale, les premiers ont mis l'accent sur l' « aspect pétrophysique » de l'altération, en marquant l'influence de la nature de la roche-mère, et le rôle déterminant des facteurs climatiques. Les seconds ont insisté sur les formes du relief ou du modelé qui en résultent ; quant aux agronomes, les sols, avec leur nature physique et leur fertilité chimique liées étroitement avec leur substratum, ont été et resteront l'objet de leurs principales préoccupations.

Cependant, notons tout de suite que les auteurs ont surtout traité de l'altération des roches éruptives, plutoniques ou volcaniques, pour laquelle nous trouvons d'abondants documents, alors que les roches cristallophylliennes ont été beaucoup plus délaissées, et où la littérature — il faut l'avouer — est assez pauvre. La raison en est, semble-t-il, dans le comportement de ces roches sur le terrain qui se révèlent d'une hétérogénéité souvent déconcertante, bien plus grande que celle pouvant exister à l'intérieur des massifs éruptifs. La variabilité des processus du métamorphisme s'exerçant suivant des directions divergentes et des intensités non uniformes d'un point à un autre, n'imprime pas toujours aux Ectinites ou aux Migmatites d'un même massif des caractères pétrographiques identiques. C'est ainsi par exemple, que si nous suivons à quelque 15 km au Nord-Ouest d'Aurillac, les affleurements des Micaschistes à Biotite le long de la rivière de la Passoune, nous trouverons sur 4 km, une succession de roches allant des Micaschistes francs aux Quartzites, avec tous les intermédiaires ; de même, dans le Morvan-Nord, alors que le granite porphyroïde de Lormes peut être considéré comme

homogène dans son faciès et sa composition chimique, les Anatexites de la région offrent des aspects variés et une constitution qui change d'une station à une autre. D'où une sérieuse source de difficultés lorsque l'on aborde l'altération d'un matériel cristallophyllien.

I. — L'ALTÉRATION PHYSIQUE

Dès lors, rien de surprenant à ce que les premiers mémoires se rapportant à la décomposition sur place des roches aient traité du granite. Offrant de façon générale de très nombreuses coupes d'arène dans la plupart des régions, il constitue un matériel d'observation facile, sur lequel ont été dégagées progressivement les conditions générales de l'altération, valables tant dans les domaines éruptif que métamorphique. En 1833, FOURNET annonce que la désagrégation de cette roche peut être assimilée à une kaolinisation, et il insiste sur l'intervention de l'eau dans ces phénomènes. Cette dernière notion fondamentale ne cessera d'être mise en lumière par les chercheurs. En 1879, A. DAUBREE, véritable précurseur de la géologie expérimentale, confirme ce point de vue, et explique que l'action mécanique des eaux courantes arrive à pulvériser tous les feldspaths, pour ne respecter seulement que le quartz. C'était reconnaître différents degrés dans la résistance des minéraux et attribuer au quartz la vulnérabilité la plus faible.

La puissance de destruction de l'eau augmente lorsqu'elle est chargée de CO_2, ainsi que l'ont montré DELFOSSE et des CLOIZEAUX, qui notent que l'orthose se transforme alors en kaolin. A. LACROIX, dans son traité sur la Minéralogie de Madagascar (1923), insistera à nouveau sur cette notion, l'eau et le CO_2 dissous, jouant un rôle déterminant dans l'altération silicatée. Conjuguant leurs effets avec ceux des acides humiques, ils « agissent, écrit l'auteur, sur les silicates originels des roches, et cela d'autant plus que la température s'élève ». Même observation de la part de DEMOLON et BASTISSE (1936) montrant que l'eau agit surtout par son énergie cinétique et que son action se trouve accrue par la présence de sels dissous. Il en résulte une pulvérisation des roches allant jusqu'à la constitution d'éléments limoneux, pulvérisation accentuée par les autres facteurs de la désagrégation : le vent par ses effets de déflation, les variations de température d'autant plus incisives qu'elles sont elles-mêmes plus brutales, les alternatives de gel et de dégel provoquant l'éclatement des cristaux, la végétation agissant par l'intermédiaire des racines et l'élaboration des acides humiques, la topographie enfin. A ce titre, étudiant la décomposition physique d'un gneiss et d'un micaschiste suivant une pente de 2 p. 100, ils précisent que des blocs de 20 cm sont réduits en gravier de 2 cm après un parcours de 6 km. Au bout d'une distance double, ce gravier est transformé en sable $<$ 2 mm. Comparant

cette désagrégation avec celle d'un granite, ils notent que celle-ci est deux fois plus lente.

Enfin, F. RINNE, dans son ouvrage « La Science des Roches » (1949), synthétise sa pensée dans cette phrase lapidaire : Le principal travail de destruction des roches est accompli par l'eau ».

Si les précipitations atmosphériques interviennent au premier chef comme facteur d'altération, elles ne représentent qu'un élément parmi l'ensemble des agents climatiques, dont la résultante fixe en définitive l'intensité de l'altération. Les conditions du climat, et en particulier la température et ses variations, doivent toujours être précisées et fortement soulignées, car les phénomènes qui se déroulent dans nos pays tempérés n'ont pas de commune mesure avec ceux observés dans les pays équatoriaux ou tropicaux, à forte pluviosité et à température constamment élevée. Les processus physiques de la désagrégation sur place qui nous intéressent pour l'instant, et qui ouvrent la voie aux réactions chimiques de l'altération que nous envisageons dans un paragraphe suivant, s'exercent avec une acuité et une puissance inconnues dans nos régions de climats tempérés. Nous pouvons à cet égard consulter l'œuvre de A. LACROIX (1923) sur Madagascar, « pays par excellence de terre rouge » où décrivant l'épaisseur de la couche d'altération de granite et de gneiss de Mandray, à l'Est d'Antsirabe, il note qu'elle atteint la valeur considérable de 130 m ; nous sommes bien loin des 6 à 7 m d'arène mesurés en moyenne dans le Morvan-Nord. Quant aux gneiss, ceux que nous avons étudiés au sud de La Tronquière, à la limite des départements du Cantal et du Lot, présentent une couche de gore visible de 3 à 4 m au plus, et une épaisseur réelle d'une dizaine de mètres (mesurée dans les puits de la région).

Cette désagrégation physique qui conduit à la latérite ou à une formation voisine, apparaît aussi puissante dans tous les pays tropicaux tels que l'Inde, la Guinée, le Soudan, qui ont fait l'objet de nombreuses recherches pétrographiques de la part de Sir THOMAS HOLLAND, J. CHAUTARD et P. LEMOINE, H. ARSANDAUX, VAN BEMMELEM, LEIGH-FERMOR, MORROW CAMPBELL (1903 à 1917).

Cette opposition frappante dans le comportement des roches sous les différents climats, sera aussi soulignée dans les mémoires de F. RUELLAN (1931), de P. BIROT (1949), de H. EHRART (1950). Tous les auteurs sont unanimes sur ce point, à telle enseigne que les chercheurs de langue anglaise et ceux de langue allemande expriment les phénomènes d'altération des roches-mères par des mots traduisant précisément l'action des facteurs climatiques — à leurs yeux essentielle — et dont il est difficile de donner en français un équivalent exact avec toutes les nuances qu'ils suggèrent : c'est le weathering anglais et le Verwitterung allemand.

Les massifs cristallins sont souvent parcourus par un réseau plus ou moins compliqué de diaclases, s'anastomosant entre elles et qui constituent de véritables saignées dans la trame de la roche. Leur étude a été menée de façon remarquable par H. KLOOS (1939). Ce sont de véritables canaux, où la circulation des eaux est particulièrement intense, où sa pression est parfois élevée et qui provoque l'accélération de la décomposition granulaire, comme l'ont montré P. BIROT (1950) et M. DERRUAU (1952). Il ne faudra pas manquer de signaler leur présence dans une telle étude.

Les différences relevées sur le terrain sous le regard de l'intensité de la désagrégation physique sont enfin sous l'étroite dépendance de la nature pétrographique de la roche-mère. Sa structure qui s'oppose plus ou moins à la pénétration de l'eau et de ses sels, sa composition chimique et minéralogique — les divers minéraux ont en effet un comportement très différent sous les coups de l'altération — la taille de ces minéraux et leur cohésion plus ou moins intime, son homogénéité plus ou moins marquée, la présence de fissures et de lignes de schistosité, sa porosité, constituent tout autant de facteurs intervenant de façon primordiale pour déterminer le degré de la résistance de la roche. La minéralogie rend en la circonstance les plus grands services et permet souvent d'expliquer pourquoi deux granites ou deux gneiss présentent des altérations si variées.

De nombreux travaux ont mis en lumière l'influence de la composition minéralogique de la roche-mère. Le problème est d'ailleurs fort complexe, car — selon P. BIROT (1949), même de faibles variations de la roche se traduisent par un comportement différent. Dans sa thèse parue en 1909, Jacques de LAPPARENT étudiant quelques porphyroïdes françaises contenant de l'Albite et du Microcline, note que les feldspaths potassiques résistent mieux que les plagioclases, s'opposant en cela aux idées de DES CLOIZEAUX et de ROSENBUSCH. L'énoncé de cette proposition devait se révéler fondamental, et elle a été confirmée par les chercheurs, en particulier A. DEMOLON (1944), P. BIROT (1949) et surtout D. COLLIER (1951) dans ses travaux sur les granites de Saint-Gervais-d'Auvergne et de Theix dans le Puy-de-Dôme. Cette grande fragilité des plagioclases est reconnue aussi dans les sols par GRAHAM, à telle enseigne qu'en 1951, il donne pour titre à une publication se rapportant au nord du Missouri et des monts Ozark : « Les feldspaths plagioclases comme indices d'altération du sol ».

F. RUELLAN (1931) et P. BIROT (1950) ont observé le comportement de la Biotite dans les granites des pays subtropicaux humides et secs, et précisé le rôle de ce minéral dans la désagrégation granulaire. Selon eux il subit le premier l'attaque d'agents météoriques, et contribue de façon efficace à la désorganisation de la structure de la roche. Il s'oppose ainsi

à la Muscovite, difficilement altérable. Quant au quartz, il est considéré comme minéral le plus résistant.

La taille des grains intervient à son tour de façon majeure. Les roches à gros grains, à texture porphyroïde, ont à juste titre la réputation d'être plus vulnérables. Il est facile de comprendre en effet que les cristaux de grande taille subissent de manière plus violente les effets des contractions et des dilatations successives, tirant leur origine des variations de température, et dont la valeur est directement proportionnelle aux dimensions linéaires de ces cristaux.

Enfin, la structure cristalline intervient dans le déroulement des processus de l'altération comme l'ont montré les travaux d'ANDREATA (1951).

Voici quelques observations typiques, glanées parmi les travaux de ces dernières années relatifs à l'influence de la nature de la roche. SCHURMANN décrit les pegmatites de la Chaîne Arabique et remarque que les roches résistantes sont des roches à orthose, et dépourvues d'éléments noirs, alors qu'une variété contenant de la Biotite est tendre. Mêmes conclusions de la part de F. RUELLAN cité par P. BIROT (1949), décrivant les granites de la région du Mont Washington, au Sud-Est des Appalaches : les plus fragiles sont à grain grossier avec Quartz, Microcline, Oligoclase et Biotite ; les plus durs, de même composition minéralogique, sont à grains moyens ; P. BIROT (1949) est frappé par les « contrastes pétrographiques » du pays d'Otavi, en Afrique du Sud, et indique que l'érosion s'est puissamment exercée sur un granite porphyroïde riche en Biotite, alors que les Inselberge en saillie se composent de granite pegmatitique, pauvre en Mica noir. Quant au Brandberg qui traverse les couches du système de Karoo, il domine, dit-il, de 1 500 m la plate-forme générale, et le même auteur explique qu'il s'agit d'un granite contenant surtout du quartz avec peu de plagioclases, de l'orthose, que la structure est de plus perthitique, et que le massif est très pauvre en diaclase : c'est une très belle illustration des propositions déjà énoncées, qui coïncident également avec ses observations de la région de Bushveld.

Dans notre pays, nous retrouvons les mêmes caractères de dureté des roches, ce qui renforce les opinions exprimées. En nous limitant à l'Auvergne, qui n'est pas trop éloignée du Morvan, nous pouvons citer un bel exemple puisé dans l'œuvre de D. COLLIER (1951) : à Saint-Gervais d'Auvergne, ce dernier montre que l'altération d'un granite à grain grossier contenant Biotite, Oligoclase et Microcline sodique, est beaucoup plus intense que celle d'un granite à grain fin, de même constitution minéralogique, à peine arénisé. Nous expliquerons dans un prochain chapitre que ces données s'appliquent au granite du Morvan-Nord.

Les conclusions de M. DERRUAU (1952) sont aussi concordantes en ce qui concerne le granite du Veinazès, au sud du Cantal, profondément

arénisé sur un front atteignant fréquemment 6 à 7 m : les échantillons de cette roche sont pauvres en Microcline, et riches en Oligoclase et Biotite, minéraux très vulnérables. Mais si ces observations sur les granites ont conduit à admettre des règles générales valables pour l'altération dans un bon nombre de cas, et ont, en la circonstance, fourni des solutions acceptables, il convient cependant, eu égard aux difficultés de ce vaste problème, d'être prudent et de ne pas généraliser trop à la hâte des remarques même dûment contrôlées. Nous n'en voulons pour preuve que cette nouvelle constatation de D. COLLIER, communiquée au cours d'une conversation, savoir que certains granites à gros grains du Massif Central se révèlent rebelles à l'altération. Ceci démontre que leur étude est loin d'être terminée, et nécessitera encore des recherches pour tirer de l'ombre les problèmes en suspens.

Quittant le domaine éruptif, et plus spécialement les granites les mieux connus, examinons brièvement les travaux ayant pour thème les roches cristallophylliennes. Ces derniers sont rares, avons-nous déjà annoncé. Dans son essai sur quelques problèmes de morphologie générale (1949), P. BIROT compare les propriétés des schistes à celles des granites et note qu'elles sont exactement opposées. Selon lui, la texture de ces roches en fait une proie facile pour l'altération verticale, mais il ne précise pas leur composition minéralogique pas plus que leur structure cristallophyllienne. Etudiant la morphologie des pays schisteux à climat frais et humide, il relève que leurs vallées sont plus profondes et plus nombreuses, bref, que l'altération est ici plus incisive.

Les schistes cristallins de l'ouest et du sud-ouest du Massif Central français, étudiés par M. ROQUES (1941), ont été passés en revue par M. DERRUAU dans un mémoire paru en 1952, lequel a proposé une échelle de résistance pour ces matériaux. A la base, l'auteur place les schistes non métamorphiques, relativement tendres, puis vient les micaschistes, un peu moins altérables, les gneiss qui rappellent les granites, les anatexites, très voisines encore de ces mêmes granites « par leur aspect extérieur et leur relief ». Les formations métamorphiques les plus dures sont représentées par les embréchites, les leptynites, dépourvues de minéraux ferro-magnésiens, et les amphibolites à cause de leur richesse en amphibole difficilement décomposable. Cette véritable synthèse constitue une source précieuse d'information, et nous ne manquerons pas de mettre en parallèle ces résultats avec ceux tirés de nos propres observations.

II. — L'ALTÉRATION CHIMIQUE DES ROCHES

Les phénomènes d'altération physique des roches en place s'accompagnent de processus chimiques dont l'intensité est en liaison directe avec les facteurs climatiques ; la forte opposition signalée entre la désa-

grégation granulaire sous climat tempéré et sous climats tropical et équatorial, se retrouve dans les réactions chimiques qui s'exercent dans ces derniers avec une puissance accrue.

L'étude de cette altération chimique a préoccupé un grand nombre d'auteurs, qui ont mené leurs investigations dans toutes les parties du monde. Mais là encore, les roches éruptives, et tout spécialement les granites, ont été les plus fouillées.

Tous sont unanimes à reconnaître le rôle fondamental de la pulvérisation mécanique qui ouvre la voie aux actions chimiques ultérieures ; il est clair que sur des fragments de roches de plus en plus fins, l'activité chimique où l'eau intervient surtout, pourra s'amorcer, et se poursuivre avec plus d'efficacité que sur des matériaux de grande dimension. C'est là un fait bien banal que l'on vérifie chaque jour en laboratoire, tout comme dans la nature. Il ne viendrait pas à l'idée d'un chimiste d'effectuer par exemple une attaque sulfo-fluorhydrique sur un échantillon de roche insuffisamment broyé.

L'appréciation des réactions globales qui se produisent en cours d'altération peut s'effectuer par la détermination des compositions chimiques centésimales d'échantillons de roche fraîche, puis altérée, enfin du sol : technique appliquée notamment par MERRILL (1895), E. BLANCK et RIESER (1926), E. BLANCK et GIESECKE (1929), E. BLANCK et THEMLITZ (1935), A. LACROIX (1923), MIHARA (1934), A. DEMOLON et E. BASTISSE (1946), Mlle CAILLERE et S. HENIN (1951), D. COLLIER (1951). Voici, par exemple, une analyse de BLANCK citée dans le tome I (page 12) de la « Dynamique des Sols » de A. DEMOLON, relative à un granite.

	Granite frais	Granite altéré
SiO_2	69,33	63,69
Al_2O_3	14,33	15,23
Fe_2O_3	4,00	4,39
CaO	3,21	2,63
MgO	2,44	2,64
K_2O	2,67	2,00
Na_2O	2,70	2,12

Nous ne discuterons pas ici de cette méthode afin de ne pas alourdir le texte de ces rappels bibliographiques, nous réservant de procéder à son examen dans un chapitre ultérieur. Elle a permis de montrer que sous nos climats, l'altération chimique des roches est très ménagée, car les variations dans les pourcentages des oxydes, certes accusés pour les bases Na_2O, CaO, MgO, sont peu marquées pour SiO_2 et Al_2O_3. Quant à K_2O, son départ est variable ; il est très faible pour les granites (travaux de D. COLLIER) (1951).

A quoi correspondent ces départs dans une roche cristalline? Là

encore les minéraux les plus sensibles à l'altération physique le sont à l'égard de l'altération chimique. Des cristaux de microcline isolés et analysés par D. COLLIER (1951) dans des sols du Puy-de-Dôme ont révélé une altération pratiquement nulle par rapport aux mêmes cristaux du granite originel, alors que les plagioclases et les biotites pulvérisées mécaniquement se vidaient de leurs bases et voyaient leur teneur en H_2O augmenter. Les mêmes faits ont été reconnus par MALTERRE pour une arène de THEIX, et par DREIBRODTZ après analyse de biotite fraîche et altérée citée par F. RINNE (1949). Le travail de destruction s'intensifiant, par hydratation reconnue dès 1901 par WATSON et par hydrolyse, on aboutit en fin de compte à une transformation argileuse, à une kaolinite selon un grand nombre d'auteurs. Nous verrons plus loin comment les méthodes d'investigation moderne ont conclu à la découverte de produits complexes où ce minéral argileux n'est pas toujours le plus abondant. Quant à la kaolinisation des feldspaths, longtemps considérée comme une notion bien acquise, elle vient d'être revue et discutée par G. MILLOT et D. COLLIER qui estiment que ce phénomène a été exagéré dans nos pays tempérés (1949 et 1951).

Gabbro de la carrière du Gallion en Guyane.

	Roche fraîche	Produit d'altération
SiO_2	48,57	12,07
Al_2O_3	13,71	28,75
Fe_2O_3	6,10	30,40
FeO	9,30	3,55
MnO	0,21	0,11
CaO	10,10	0,90
MgO	6,44	1,00
Na_2O	1,86	0,25
K_2O	0,40	0,25
TiO_2	1,60	2,85
P_2O_5	0,29	0,30
H_2O^-	0,55	2,43
H_2O^+	0,60	16,80
Total	99,73	99,66

A. LACROIX (1923), EHRART (1935), Mlle S. CAILLÈRE et S. HENIN (1951) ont travaillé sur l'altération chimique des roches en pays tropicaux et s'accordent à reconnaître ici la primauté des phénomènes climatiques, alors que l'influence de la roche-mère est pratiquement inexistante. Les granites, les diabases, les gabbros, les gneiss, les micaschistes, s'altèrent de façon identique, de sorte que la roche originelle est surmontée d'une zone plus ou moins épaisse, souvent concrétionnée, occupée par une formation latéritique. Selon A. LACROIX, pour qui la latérisation est un cas particulier de la décomposition des roches silicatées alumineuses, il y a à la base une « zone de départ » où les silicates sont décomposés, avec élimination à peu près totale de CaO, MgO, K_2O, Na_2O, perte impor-

tante de SiO_2, et au sommet une « zone de concrétion » avec concentration de Al_2O_3 et Fe_2O_3.

Les produits d'altération demeurant au stade argile dans nos pays tempérés, subissent une attaque chimique plus poussée qui aboutit à la production d'hydrates d'alumine : $Al_2O_3\ 3\ H_2O$ et $Al_2O_3\ H_2O$, et d'hydrates de fer. Nous allons puiser dans une note de Mlle Caillère et S. Henin (1951) deux analyses relatives à l'altération d'un gabbro en Guyane qui illustreront l'intensité des actions chimiques, hors de proportion avec celles décelées en Europe occidentale.

Les produits altérés sont constitués, outre une petite quantité de roche fraîche (2 à 9 p. 100) par de la kaolinite 15 p. 100, de l'hydrargillite 15 à 33 p. 100, et 34 p. 100 de goethite. Les analyses de roches citées par A. Lacroix et Ehrart à Madagascar sont du même type.

Comment s'effectue la rupture du kaolin dans les pays soumis à l'alternance des grandes pluies et de la sécheresse? A. Lacroix (1923), (ouvrage cité p. 102) a envisagé la probabilité de réactions biochimiques, grâce à des microorganismes, en appuyant son argumentation sur les travaux de Vinogradsky, montrant l'intervention des Ferrobactéries dans la précipitation de l'hydrate de fer, et de M. W. Vernadsky (1922) signalant la formation d'hydrate d'alumine dans la décomposition du kaolin par des Diatomées en présence de bactéries. Il semble que la question ne soit pas encore tranchée, et le champ des recherches largement ouvert, d'autant que G. Waegemans, en 1951, à la suite d'une étude sur les latérites de la région de Matadi-Séké Bauza (Congo Belge), a précisé que la kaolinite formée par altération de roches vertes à épidote ne donnerait pas naissance à de l'alumine libre. « Il y aurait seulement accumulation d'oxyde de fer. La latérisation serait un phénomène agissant sur les constituants néogènes du sol autres que les minéraux argileux du type kaolinite. » Quant à A. Cailleux et J. Tricart, ils viennent de reprendre (1956) les idées de A. Lacroix sur la latérisation et marquent pour ces phénomènes l'action prédominante de la biosphère grâce à sa vie bactérienne intense, « biotope sous la dépendance du climat ».

III. — ÉTUDE MINÉRALOGIQUE DE L'ALTÉRATION UTILISATION DES PROCÉDÉS OPTIQUES

Mise à part la détermination des produits ultimes de la dégradation chimique (les argiles), le microscope polarisant et la loupe binoculaire constituent de merveilleux instruments d'observation, largement utilisés. En 1905, Delage, Lagatu et Dumont ont dressé un inventaire des espèces minéralogiques de quelques sols de l'Aveyron, élaborés sur place aux dépens de schistes sériciteux. La même année, L. Cayeux met-

tait l'accent sur le rôle de l'analyse minéralogique dans l'analyse des terres et étudiait la conservation des minéraux dans la terre arable, notant leur degré d'altération très différent. La minéralogie des sols fit plus tard l'objet de mémoires de la part de HENDRICKS et NEWLANDS en Angleterre (1933), d'AGAFONOFF pour les sols de Tunisie (1936), lequel donna en 1939 une mise au point des acquisitions en ce domaine. L. BERTHOIS (1935), avait recherché les minéraux lourds dans les granites de Bretagne. Vinrent ensuite les notes de Y. NOVARK (1938), proposant une classification des minéraux des sables d'après leur densité, de BRAJNIKOV (1942) sur les sables au sud de la Seine, de D. CARROLL, sur les sols de Denmark (Australie de l'Ouest) (1946), de VATAN, sur les formations sableuses au sud de la Loire (1947), de D. COLLIER (1948), sur les terres noires de Limagne.

C'est à J. DE LAPPARENT (1909) que revient le mérite d'avoir suivi au microscope le devenir des feldspaths. Il a montré que les plagioclases apparaissaient en lames minces, saupoudrées de Séricite, minéral secondaire, qui n'est pas le résultat de transformations dynamométamorphiques, alors que le Microcline n'était pas affecté par cette séricitisation, ce qui confirmait sa résistance à la dégradation chimique. Mais des analyses de Benedicks révélant que la séricite était un minéral potassique, se posait aussitôt le problème de l'origine de cette potasse dans un minéral qui en est dépourvu, et J. DE LAPPARENT d'invoquer soit la kaolinisation de l'orthose, hypothèse jouissant alors d'un large crédit, soit la dissolution de ce minéral, hypothèse alors toute nouvelle ou, en son absence la chloritisation des biotites dont il avait par ailleurs suivi l'évolution au microscope. Ces explications donnèrent satisfaction et furent enseignées par les géologues et pédologues, jusqu'au jour où successivement G. MILLOT (1949) et D. COLLIER (1951) reprirent la question de la kaolinisation comme nous l'avons signalé au paragraphe précédent, et annoncèrent que le gain en potasse de la séricite ne pouvait provenir de cette transformation, mais plutôt de la « dissolution superficielle » des feldspaths potassiques.

J. DE LAPPARENT décrivit également des inclusions et des granulations fines, visibles au microscope, au sein des Microclines en voie d'altération, et KORSHINSKY (1940), poursuivant ses recherches, dénombra deux catégories d'inclusions, les unes solides et les autres liquides dispersées dans la masse des feldspaths, mais selon lui, ces inclusions ne seraient pas la conséquence de l'altération ; leur apparition serait un fait spontané lorsqu'un feldspath est ramené d'une zone profonde à la surface où il se révèle instable. En la circonstance, nous ne prendrons pas position, n'ayant jamais rencontré de telles inclusions dans les échantillons étudiés (hormis dans une anatexite d'Empury).

Si les observations minéralogiques ne sauraient à elles seules déceler

l'ensemble des phénomènes au cours de l'altération d'une roche cristalline — la chimie est ici irremplaçable — elles n'en fournissent pas moins des renseignements précieux quant à la nature et l'aspect optique des cristaux, depuis la roche-mère jusqu'au sol, sans oublier l'identification de matériaux étrangers à cette roche-mère qui peuvent être par exemple le fait de transports. A. DEMOLON semble avoir quelque peu minimisé le rôle de l'analyse minéralogique qui ne « constitue qu'une annexe des méthodes pédologiques », écrit-il (1944).

Pour notre part, nous avons largement tiré profit de cette technique, tant dans les études des zones d'altération que dans celles des sols du Morvan-Nord.

IV. — L'ÉTUDE DE L'ALTÉRATION DES ROCHES AU LABORATOIRE PAR DES MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Un certain nombre d'auteurs ont imaginé d'examiner au laboratoire l'altération des roches, de façon à serrer de plus près l'extraordinaire complexité des phénomènes qui se déroulent dans la nature : problème hardi et certes, délicat, car les conditions d'expérimentation « in vitro » ne peuvent que difficilement se rapprocher de celles existant « in situ », mais qui ont cependant conduit à des résultats positifs.

Ce fut DAUBREE, en 1879, qui donna le signal de départ de ces expériences. Dans un cylindre de fer, 3 kg de feldspaths furent brassés au contact de 5 l d'eau distillée, durant 192 h ; à la suite de cette opération, il avait recueilli 2 kg 72 de boue limoneuse dont 36 g étaient constitués par une substance argileuse. En même temps, l'eau s'était chargée de 12,6 g de potasse. La méthode fut reprise par ZEMIATCHENSTKY (1933) et O. TAMM (1934) ; mais si l'argilisation des feldspaths avait de la sorte été mise en évidence, ce mode opératoire s'écartait trop des conditions naturelles de l'altération.

L'action prépondérante de l'eau fut démontrée facilement par des essais réalisés en Amérique, notamment par BLACKWELTER et BARTON, essais qui prouvèrent également que des oscillations de température, même violentes, ne peuvent à elles seules triompher de la cohésion de la roche. Des fragments de granites portés à 200°, 12 fois de suite, ne manifestèrent aucun effet de rupture.

Mais l'eau pure n'a qu'un pouvoir limité de destruction qui s'accentue lorsqu'elle est chargée de CO_2. Ce fait a été vérifié expérimentalement par DUMONT avec un granite du Morvan comme matériel, et tout récemment par Jan Van KEYMEULEN et Willy DEKEYSER (1953 et 1956), avec la biotite et la muscovite. Ils ont imaginé un dispositif où ces minéraux léchés constamment par de l'eau distillée sont placés dans un cou-

rant de CO_2 à la température ambiante du laboratoire. Les produits de la réaction des micas avec CO_2 sont entraînés dans un ballon collecteur où ils sont accumulés, puis analysés. Il se produit une altération de ces micas, qui se dissolvent chimiquement, suivant un processus assez rapide, tout comme l'avait remarqué CORRENS (1952), alors que ces mêmes minéraux traités à une température de 80° à 100°C, dans des volumes connus d'H^2O distillée ayant dissous des sels minéraux, n'ont subi qu'un effeuillement, se traduisant par une granulométrie bien définie, fonction des ions du milieu — sans aucune trace d'altération chimique. Remarquons toutefois que la concentration du CO^2 utilisé, n'est pas celle de la nature.

Analyse mécanique.

	Sables grossiers	Sables fins	Limon	Fractions argileuses	
	> 200 µ	20 - 200 µ	2 - 20 µ	0,75 - 2 µ	< 0,75 µ
1935	71,0	25,20	2,96	0,49	0,32
1945	64,75	29,50	3,85	1,00	0,45

DEMOLON et BASTISSE (1946) ont étudié l'altération spontanée d'un granite à deux micas provenant de Bretagne, abandonné en cases lysimétriques d'abord durant 5 ans (1930-1935), puis pendant une période de 10 ans ; ils sont partis d'une masse de 800 kg de roches réduits par concassage et tamisage à l'état de fragments de 2 à 4 mm de diamètre. Le matériel initial était donc en réalité une arène granitique soumise aux agents atmosphériques. Les analyses mécaniques et chimiques effectuées sont très suggestives.

Analyse chimique, 1945.

	Granite frais	Granite altéré				
		Sables grossiers	Sables fins	Limon	Argile	
					Grossière	Fine
SiO_2	74,74	75,80	73,50	67,50	61,40	53,80
Al_2O_3	13,50	14,23	15,29	18,29	20,81	22,43
Fe_2O_3	1,50	1,57	1,96	2,86	2,62	3,59
Fe_2O_3 combiné	1,50	1,57	1,96	2,86	2,62	3,59
FeO libre	—				1,67	2,98
CaO	0,93	1,27	1,32	1,39	1,33	1,32
MgO	0,59	0,58	0,75	0,89	1,35	1,84
K_2O	4,63	4,77	4,90	5,06	5,16	5,34
Na_2O	1,86	1,80	1,85	2,48	0,90	0,30
P_2O_5	0,25	—	—	—		
H_2O	0,90	0,72	0,87	2,50	4,65	7,50

Le tableau indique que la pulvérisation se poursuit sans intervention d'énergie extérieure.

Les auteurs ont ainsi, expérimentalement, démontré le rôle essentiel de l'hydratation, l'augmentation de l'eau fixée dans les éléments les plus fins permettant de conclure que ce phénomène provoque une pulvérisation par éclatement ou clivage jusqu'au stade de dispersion colloïdale.

Les études expérimentales sur l'altération ont fait l'objet de plusieurs travaux de la part de P. Birot, consignés dans une série de mémoires parus de 1947 à 1954. Il a soumis en 1947, différents échantillons de roches cristallines (diorites, syénites, mais surtout granites), ainsi que des cristaux de grande taille de biotite, muscovite et orthose à une série de traitements qui se sont poursuivis 5 à 7 mois ; un certain nombre de fragments demeuraient 12 heures dans l'eau de pluie à la température ordinaire et 12 heures au sec à température ordinaire ; d'autres, 12 heures dans l'eau à la température ordinaire et 12 heures en étuve sèche à 70°, ; d'autres dans l'eau à 70° et après évaporation sur place, au sec, à la même température ; enfin une série dans l'eau à 50° en permanence. P. Birot put ainsi reconstituer la désintégration granulaire des roches soumises à des variations importantes de température et d'humidité, et vérifier que seules des variations d'humidité sont impuissantes pour provoquer ce phénomène. Il observa aussi le processus de la décomposition argileuse pour la série d'échantillons demeurant en permanence dans l'eau à 50° (conditions proches du climat équatorial) où nous avons déjà signalé la généralisation de ce problème.

De nouvelles recherches sur plusieurs variétés de granites (1950) traitées dans les mêmes conditions générales, ont démontré la rapidité des processus de l'arénisation sous la dépendance d'agents météoriques. Il a observé en même temps la rapide altération de la biotite, se traduisant par un « gonflement et éclatement des lames, d'une part, et entraînement du fer, d'autre part, sans modification des propriétés optiques ». Quant aux différences de vitesse de décomposition des granites, P. Birot (1950) met l'accent sur la notion de porosité étroitement liée à la structure, qui varie pour ces roches de 0 à 1 p. 100 ; c'est ainsi qu'il rend compte de la grande résistance du granite de Saulieu dont la porosité est pratiquement nulle, et de la vulnérabilité du granite de Louvigny, de composition minéralogique identique, mais dont la porosité est de 0,3 p. 100. Cette notion primordiale dans l'altération des roches sédimentaires — les récents essais expérimentaux de E. Bonifay (1955) viennent de le confirmer — se retrouve donc dans les roches éruptives, et peut conduire, à la faveur de nouvelles recherches, à des découvertes du plus grand intérêt.

P. Birot (1954) a poursuivi ses investigations relatives à la désagrégation des roches cristallines en décrivant leur comportement sous l'action de certains sels, notamment l'hyposulfite de Na, le CO_3Na_2 et SO_4Na_2. Il a pu ainsi accélérer les processus de l'arénisation. Ces mêmes

expériences avaient été conduites par S. HÉNIN en 1953, en traitant des fragments de schistes autuniens de Bourbon-Lancy par plusieurs solutions très diluées de Cl_2Mg, SO_4H_2 et CO_3Na_2, de façon à se rapprocher des dilutions naturelles ; et l'auteur de conclure à une altération relativement rapide de ces roches, en liaison par ailleurs avec la nature des solutions à leur contact. Signalons également que ce même auteur, avec la collaboration de O. ROBICHET (1953), s'est préoccupé des conditions de formation des minéraux argileux, par voie expérimentale, à basse température ; ils ont pu obtenir un diagramme de kaolinite en partant d'une solution d'aluminate, très faiblement concentrée, une dilution voisine des solutions naturelles leur apparaîssant la condition sine qua non de la réussite de tels essais.

Toujours dans le domaine de la recherche expérimentale, il faut citer les études de CORRENS et de ENGELHARDT citées par G. MILLOT sur l'altération des feldspaths ; ils ont monté un dispositif dans lequel l'eau distillée percole dans un tube à travers la poudre de ces feldspaths qui se dissolvent à l'état d'ions et d'une façon très rapide en milieu acide. G. MILLOT a repris la même question et a pu reproduire le trouble des feldspaths potassiques.

Que conclure de l'ensemble de ces travaux? L'énoncé des principaux résultats acquis et la reconstitution au laboratoire de faits observables sur le terrain attestent que leur bilan est positif. Toutefois, remarquons avec M. DERRUAU (1954) que ces essais ne sauraient reproduire exactement les conditions climatiques et physico-chimiques du milieu extérieur ; les vitesses de réaction ne sont pas identiques et la marche continue des phénomènes reconstitués in vitro n'est pas celle qui se déroule dans la nature, où il est facile d'imaginer des alternatives d'attaque violente, consécutive par exemple à une saison pluvieuse, suivie de ralentissement, voire d'arrêt total des processus de désagrégation. Aussi partageons-nous entièrement l'opinion du dernier auteur cité, recommandant qu'il « faut confronter les résultats de l'expérimentation avec ceux de l'altération séculaire tels que nous les livre la nature ».

NOTA

La réduction de ce paragraphe relatif à la décomposition des roches au laboratoire était achevée lorsqu'ont paru plusieurs notes très intéressantes sur ce problème, plus que jamais à l'ordre du jour. G. PEDRO (juin-juillet 1957) observe la dégradation d'un granite à biotite et de la lave de Volvic sous l'influence de certains sels. Plus récemment encore (octobre 1957), ce même auteur travaillant avec S. HÉNIN mit en évidence la rapide dislocation du granite à biotite par traitement à H_2O_2 à chaud. Une série d'essais par traitement à H_2O_2 à froid a provoqué également la décomposition de la roche au bout de 2 mois et une semaine.

CHAPITRE II

L'ALTÉRATION SUR PLACE DU GRANITE PORPHYROÏDE DE LORMES (Nièvre) CHOISI COMME TERME DE COMPARAISON AVEC LES ANATEXITES A CORDIÉRITE DU MORVAN-NORD

Avant d'aborder l'examen de l'altération des anatexites, seules roches cristallophylliennes du Morvan-Nord, il nous a paru intéressant de traiter du mécanisme de dégradation du granite de Lormes au contact de ces roches ; à la suite des mémoires de D. COLLIER, nous disposons, en effet, d'une documentation abondante et de méthodes affirmées que nous essaierons d'appliquer au domaine cristallophyllien ; la comparaison des altérations de ces deux socles dans une région où les conditions topographiques et climatiques sont identiques, permettra de tirer d'utiles renseignements agronomiques en ce qui concerne la fertilité des sols de la contrée.

I. — ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE DU GRANITE PORPHYROIDE DE LORMES

Le granite porphyroïde de Lormes, étudié par A. COCHET (1953), occupe dans le Morvan-Nord, une grande superficie ; il constitue la région de Lormes, de Saint-Martin-du-Puy, de Chalaux, Brassy, Dun-les-Places, Gouloux et Alligny-en-Morvan. Limité à l'ouest par la grande faille séparatrice des formations sédimentaires du Centre de la Nièvre, dont nous avons déjà parlé, à l'est par la vallée de la Cure, il est en contact au nord avec les Anatexites à Cordiérite depuis Empury-Chastellux, jusqu'au delà de Saint-Brancher dans l'Yonne, tandis qu'au sud, il s'enfonce sous le microgranite d'Ouroux pour reparaître dans les environs de Château-Chinon. Les coupes naturelles sont nombreuses, ce qui facilite son examen que l'on peut effectuer par exemple le long des routes Corbigny-Lormes, Avallon-Lormes, à la sortie immédiate de cette dernière localité — Lormes-Corbigny. Cependant, il n'est pas observable partout car il est coiffé sur toute son étendue, d'une puissante couche d'arène pouvant atteindre 6 à 7 m.

Si, au départ de Lormes, on parcourt le massif dans toutes ses directions, on découvre une homogénéité assez remarquable dans son faciès. Il s'agit d'un granite porphyroïde blanc grisâtre à reflets roses, à grands cristaux de feldspaths pouvant atteindre 3 à 4 cm de long et 1 cm de large, baignant dans une trame riche en quartz et relativement pauvre en biotite.

Constitution minéralogique.

L'examen microscopique montre les minéraux suivants :
— Lame mince : 4.164.
— Lame mince : 4.213,
— Lame mince : 6.978.
Quartz.
Microcline anorthose (2 V = — 64°).
Oligoclase.
Biotite.
Chlorite (rare).
Minéraux opaques : rares, surtout Magnétite.

La structure est typiquement grenue. Le Quartz développe des sections xénomorphes intactes, mais quelques plages présentent une extinction roulante. Le Microcline anorthose est très abondant et montre de grands porphyroblastes, assez souvent parcourus par de fines fissures, traduction d'effets mécaniques à l'intérieur du granite et dans lesquelles peuvent s'accumuler des produits opaques.

Le Plagioclase se présente en sections automorphes de taille supérieure à celle du Microcline, et bien plus grande que celles du Quartz. L'aspect des cristaux est très variable, à côté de plages intactes, bien saines, permettant la détermination d'une Oligoclase (An_{20} à An_{25}), on peut en observer d'autres où les clivages sont gagnés par des lamelles ténues de Séricite et qui témoignent déjà d'un début d'altération dans un échantillon pourtant très dur.

Quant à la Biotite, elle est en lames de quelques millimètres de long, et très faiblement chloritisée, sur certaines sections ; celles-ci sont effilochées à leurs extrémités, quelquefois cassées, toutefois leur polychroïsme est conservé et l'on note aussi la présence d'auréoles pléochroïques. L'apatite apparaît surtout dans la L. M. 6978 en cristaux d'assez grande dimension. Les minéraux opaques rares sont formés en majeure partie de granulés de Magnétite, dispersés sur l'ensemble de la lame.

Composition chimique du Granite de Lormes.

L'homogénéité des structures microscopique et macroscopique du granite de Lormes semble se conserver dans sa nature chimique comme

l'indique la comparaison des résultats des deux analyses suivantes, la première se limitant aux éléments essentiels figure dans la thèse de A.Michel LEVY (1908), et la seconde (nº 408) a été effectuée par M. THERON, pour une roche recueillie à la sortie de Lormes, sur la route d'Avallon, à quelques mètres du lieudit « Carrière de l'Abattoir » (Echantillon R. 59 dans notre nomenclature).

Granite porphyroïde de Lormes (Nièvre).

	An. A. Michel LÉVY (Thèse 1908) p. 224	An. M. THERON nº 408 Clermont-Ferrand (Juillet 1955) Echantillon R. 59
SiO^2	72,80	71,05
Al_2O_3	14,00	15,20
Fe_2O_3		2,12
FeO	2,50	0,70
P_2O_3		0,05
TiO_2		0,40
MnO		(traces)
CaO	1,20	1,27
MgO	0,90	1,17
K_2O	5,90	3,80
Na_2O	3,00	2,75
H_2O^+		0,83
H_2O^-		0,06
Total	100,30	99,40

De ce fait, les données chimiques du granite sont très voisines et permettent de le définir avec une part plus réduite d'incertitudes.

Composition virtuelle tirée de l'analyse 408 *(échantillon R.* 59).

Q	36,42	SiO_3Mg	2,90
Or	22,24	Ma	1,16
Ab	23,05	Il	0,76
An	6,11	Hém	1,28
Cor	4,38		
Coupholites =	92,20	Barylites =	6,10
Orthose/plagioclases =	0,76	An % =	21

Paramètres C. P. I. W. : 1 3' 2 3 (3 1 1 2)

Il s'agit donc d'un granite hololeucocrate calco-alcalin, plus riche en plagioclases qu'en Microline, à forte teneur en soude et en potasse, et de nature monzonitique. D'autre part, le pourcentage en corindon virtuel est assez élevé.

Nous pouvons caractériser davantage cette roche par ses paramètres de NIGGLI qui sont les suivants :

al = 46,5	Si = 370	K = 0,46
fm = 20,3	ti = 1,56	Mg = 0,45
c = 6,8	p = 0	qz = + 165,2
alc = 26,2		

Paramètres donnant le point de projection dans le Diagramme triangulaire de C. BURRI et P. NIGGLI et permettant la représentation gra-

phique des principales caractéristiques de la composition chimique et minéralogique des roches.

Cas ou alc < al < alc + 2 c + fm
Q = Si — [50 + 2 alc — al]
L = 3 (2 alc + c)
M = 3 (50 — alc + c)

Formules citées par R. MICHEL (1953).

Q = 57,8
L = 32,7
M = 9,5

II. — ARÉNISATION DU GRANITE DE LORMES

L'une des caractéristiques essentielles de ce granite — et ceci est un nouvel argument en faveur de son homogénéité — est la quasi généralisation de son intense altération physique dans toute la région. Les coupes naturelles abondent sur toute l'étendue du massif et elles livrent les horizons suivants : d'abord C_1 où la roche est pourrie auquel fait suite une épaisse couche d'arène C_0 (2 m à 7 m, formation cohérente aux affleurements), enfin un sol A de 10 à 25 cm qui se divise parfois en deux horizons A_0 et A_1. L'horizon B n'apparaît pas, contrairement à ce que signale L. BERTHOIS (1949) dans les arènes de Bretagne. On note aussi la présence assez fréquente de boules à l'intérieur de l'arène et d'un réseau plus ou moins complexe de diaclases ou de fissures.

Voici les principales carrières où il est aisé d'observer l'arénisation de ce granite ; leur position exacte est précisée par les coordonnées Lambert des cartes E. M. au 1/800 00.

1° Au nord-est et à l'est de Lormes.

1. — Les deux carrières de l'Abattoir à 500 m, à la sortie de Lormes (712,4 × 256,4). Nous avons retenu l'une d'elles pour l'étude des phénomènes d'altération du granite porphyroïde du Morvan-Nord.

2. — Carrière sur la route N. 444, Lormes-Avallon, 1 km avant Saint-Martin-du-Puy (714,7 × 260,3).

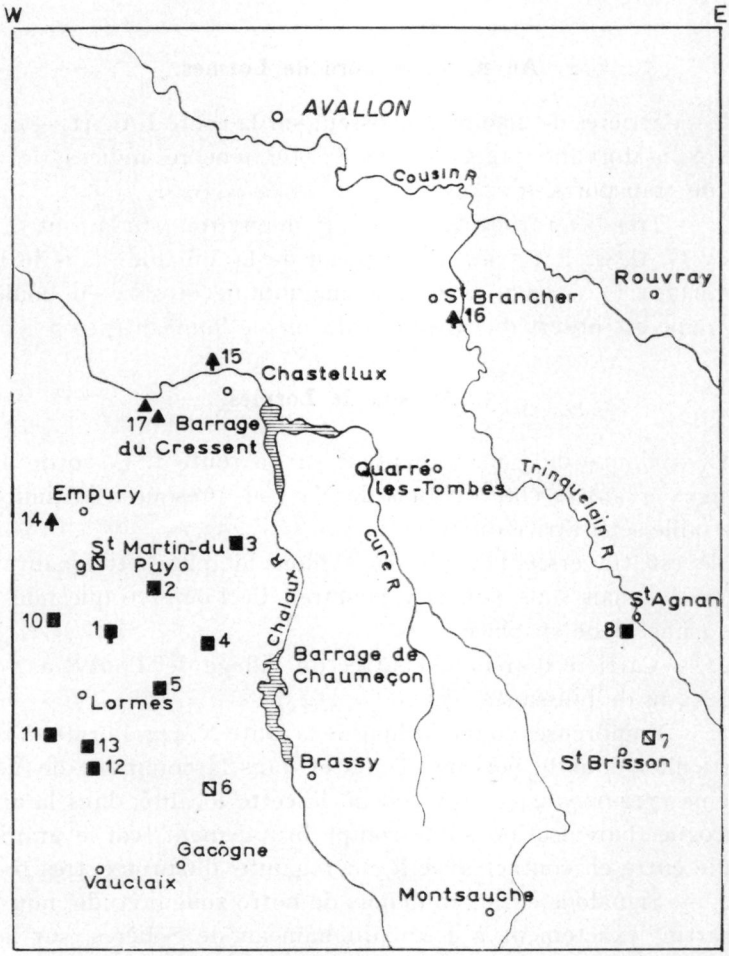
3. — Carrières de Montcrecon : Route I. C. 28 de Saint-Martin-du-Puy à Quarre-les-Tombes (717,0 × 261,6) — leur front observable atteint 6 m.

4. — Carrières du Bois de Saint-Martin, le long de la route Saint-Martin-du-Puy à Plainefas I. C. 138 (716,2 × 257,9).

5. — Carrière à 300 m du carrefour des routes I. C. 138, Plainefas-Sonne-Lormes et Lormes-Brassy G. C. 6 (713,9 × 255,8). On y remarque une splendide arénisation avec des boules énormes d'une rotondité pres-

que parfaite, et de larges diaclases (3 à 4 cm) paraîssant s'enfoncer profondément dans le massif granitique.

POSITION DES PRINCIPALES CARRIERES D'ARENE ET DE GORE DU MORVAN-NORD



Carte 2.

6. — Carrière du Bois de Fadray à 6 km de l'est de Lormes sur la route G. C. 17 Lormes-Montsauche (« dite carrière de Brassy »), (716,2 × 252,0). Front sans doute le plus imposant de la région avec ses 12 m de

puissance, coupe du plus haut intérêt pour l'observation des phénomènes de transport ayant affecté les arènes du Morvan-Nord.

7. — Carrière de St-Brisson à 1 km du Château de St-Brisson, sur la route G. C. 6 Lormes-Saulien (733,8 × 254,1). Solifluxion atténuée.

8. — Carrière de St Agnan, à la sortie du bourg, sur la route G. C. 20. Front très important (5 à 6 m de puissance).

2° Au n. w. et nord de Lormes.

9. — Carrières de 2,50 m d'épaisseur sur la route I. C. 41. — Lormes-St-André-en-Morvan (712,5 × 260,8). Ici, encore indices de phénomènes de transports.

10. — Très beau front de carrière (7 m environ) sur la route Lormes-Clamecy G. C. 42 à 1,5 km du hameau de la Villaine, dans le bois de Mongera (711,3 × 257,7), avec une magnifique érosion en boule. Une autre coupe est observable à 100 m du même hameau (710,7 × 258,5).

3° Au sud de Lormes.

11. — Coupe de 3 m de hauteur sur la route I. C. 70 de Lormes à Corbigny avant la côte du Bois de Narvau, presque à la limite de la grande faille séparatrice du Morvan (710,5 × 253,7).

Elle est traversée par plusieurs filons d'aplite atteignant parfois l'horizon A_1, mais sans jamais y pénétrer. Ceci prouve que nous avons affaire à une arène en place.

12. — Carrière d'arène à l'entrée du village de Ponty, à 5 km de Lormes (2 m de puissance) (713,0 × 252,9).

13. — Nombreuses coupes le long de la route N. 444, Lormes-Vauclaix, en particulier dans le bois des Tours et dans la commune de Vauclaix elle-même (712,6 × 249,2). A 200 m de cette localité, dans la direction de Gacogne, l'arénisation s'interrompt brutalement, car le granite porphyroïde entre en contact avec le microganite d'Ouroux, très résistant.

14. — Signalons enfin, en dehors de notre zone d'étude, non loin de Dommartin, exactement à 1 km du hameau de Solières, sur la route Nevers-Château-Chinon, une carrière absolument remarquable. Parcourue par un réseau très compliqué de diaclases, ces dernières de couleur ocre tranchant sur le gris de l'arène, attestent la circulation active du fer dans tout l'horizon Co.

CHAPITRE III

DIFFICULTÉS DANS LE CHOIX D'UNE CARRIÈRE D'ARÈNE POUR L'ÉTUDE DE L'ALTÉRATION DE LORMES IMPORTANCE DES PHÉNOMÈNES DE TRANSPORTS PÉRIGLACIAIRES

Tout comme l'avait fait D. COLLIER dans son travail sur l'altération des granites du Massif Central, nous allons comparer le granite de Lormes à l'état frais et à l'état altéré, avec ses produits de décomposition : l'arène et le sol, au point de vue physique, minéralogique et chimique. Mais, ceci suppose le choix d'une carrière où ces différents horizons sont disposés suivant un même profil, et où l'homogénéité du gisement apparaît satisfaisante. Or, ces conditions ne sont pas remplies dans le Morvan-Nord. En effet, dans l'ensemble des carrières citées au paragraphe précédent, le socle granitique n'est pas observable ; de sorte que l'on se trouve dans l'obligation de prélever la roche saine en dehors du profil ; bien que nous ayons montré la relative homogénéité de ce granite, il se peut qu'en ce point, sa structure mais surtout sa composition chimique originelle puisse être différente.

D'autre part, en ce qui concerne l'arène, sa pulvérisation sur place, sous la dépendance des agents atmosphériques essentiellement changeants et agissant avec une intensité très variable, conduit à un matériel par définition même hétérogène, où les données chimiques sont susceptibles de varier d'un point de la coupe à un autre. De plus, dans le Morvan-Nord, des phénomènes de transport, d'autant plus accusés que la topographie est elle-même plus marquée, sont venus modifier la structure de ces arènes, de sorte que dans plusieurs situations, une fraction des matériaux de la coupe n'a pas été élaborée sur place.

Afin de limiter les causes d'erreur impossibles cependant d'être éliminées totalement dans une telle étude, il faudra avoir soin d'effectuer les observations *en région plate* où les transports sont les plus faibles et sur *du matériel décomposé sur place*, ce dont on s'assure par la recherche de filons recoupant les arènes.

LES PHÉNOMÈNES DE TRANSPORTS PÉRIGLACIAIRES AYANT AFFECTÉ LES ARÈNES GRANITIQUES DU MORVAN-NORD

Ces derniers ont fait l'objet d'un mémoire rédigé avec la collaboration de MM. J. André et M. Sajot ; nous prions le lecteur de se reporter au texte paru dans les Cahiers du Laboratoire de Géographie de la Faculté des Lettres de Dijon n° 1, 2 (janv-déc. 1956), mais eu égard à l'importance de ces phénomènes, venus perturber la disposition initiale des arènes, nous croyons ne pas devoir les passer sous silence et rappeler ici leur description.

Ils sont observables en divers points du massif de Lormes, notamment :

a) Sur la route Lormes-Montsauche, dans une carrière près de Brassy, déjà citée (coordonnées E. M. au 1/80 000 : X = 716,2 ; Y = 252.

b) A la sortie de St-Brisson : X = 733,8 ; Y = 254,1.

c) Sur la route Lormes-St-André-en-Morvan X = 712,5 ; Y = 260,8.

d) Dans la région de Dun-les-Places (communication verbale de M. le Professeur J. Pouquet.

e) Dans la région, autour de Montsauche.

a) Description de la carrière située près de Brassy, (partie de la carrière parallèle à la route).

Sur la route de Lormes-Montsauche à 6 km de Lormes s'ouvre une très grande carrière d'une cinquantaine de mètres de large et d'une hauteur voisine de 12 mètres. Il est d'ailleurs impossible d'en déterminer la hauteur totale car le socle granitique n'est pas apparent sur la coupe observée.

Description de la coupe.

Du sommet à la base, on observe :

1. — *Un sol* : d'épaisseur 15 cm en moyenne, avec un horizon A_0, humifère (5 cm) de couleur noire, et un horizon A_1 peu épais (5 à 10 cm) grisâtre.

Il s'agit d'un sol forestier avec Quercus pedonculata, les arbres sont d'une vigueur moyenne.

2. — *Une zone grise* : de 35 cm de moyenne, plissotée.

3. — *Une zone rouge brique* : très peu épaisse.

4. — *Une importante zone arénisée* (1,50 m), dessinant une loupe avec quelques blocs d'aplite anguleux peu altérés. Ces derniers voisinent avec des blocs de granite qui eux ont subi une intense altération.

PHENOMENES PERIGLACIAIRES

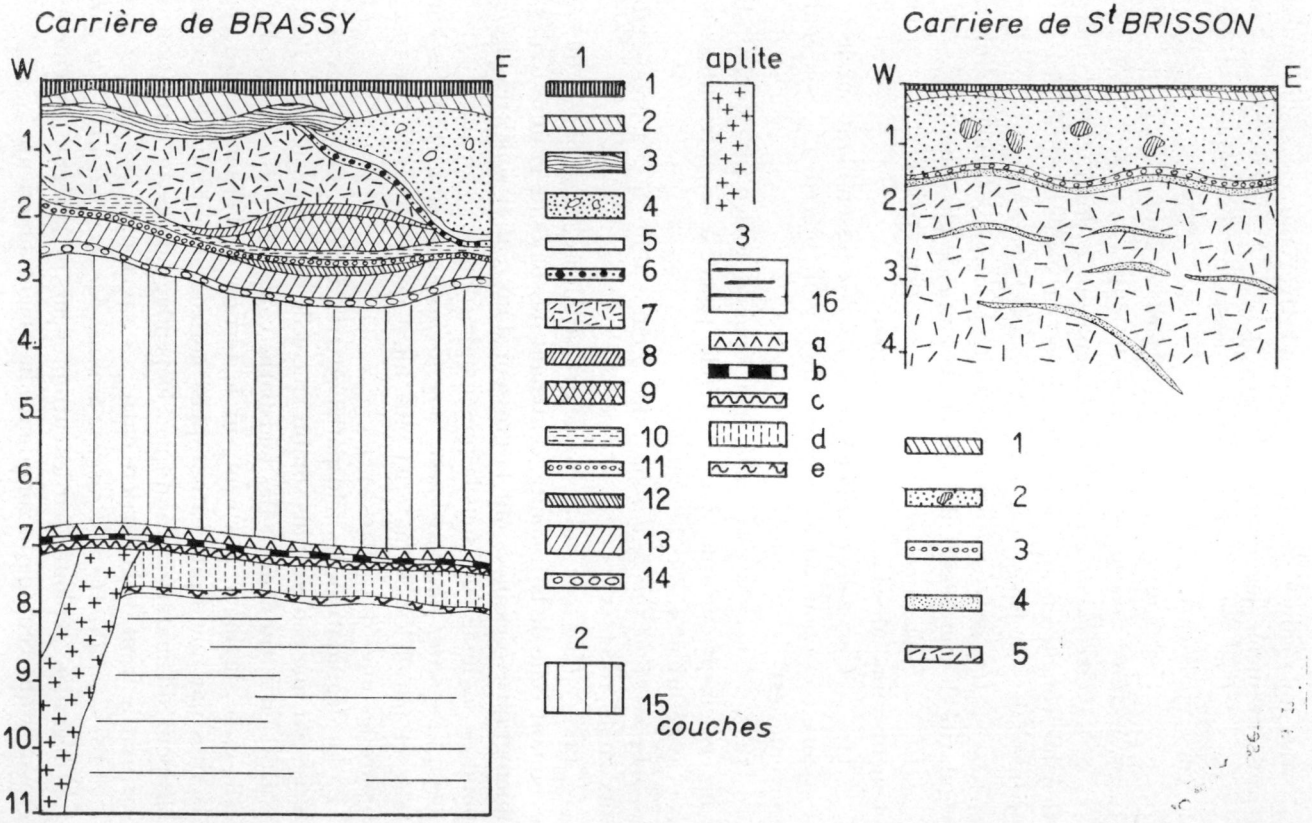


Schéma 1.

Ceci dénote également que l'altération des granites peut être très rapide.

Les microclines de cette zone sont très craquelées, disloquées, et paraissent même légèrement altérées.

5. — *Une petite zone sableuse* : dessinant un ample feston (15 à 20 cm d'épaisseur).

6. — *Une zone à cailloutis et graviers* : calqué sur la précédente.

7. — *Une zone bistre* : en forme de loupe.

8. — *Une bande grise* : très peu épaisse, 10 à 15 cm, de couleur lie de vin : couche en arc de cercle, pincée en ses extrémités, à concavité orientée vers la base.

9. — *Une zone en lentille* : de forme bi-convexe, remarquable par la régularité de son dessin, il s'agit d'une loupe de glissement.

10. — *Une bande de couleur rouge* : peu épaisse (15 à 20 cm), à éléments fins, dessinant des ondulations.

11. — *Une zone à cailloutis et graviers* : ressemblant sur le terrain à la zone 6 et épousant les contours de la zone précédente. Son épaisseur moyenne est de 10 cm.

12. — *Une nouvelle couche* peu épaisse à éléments couleur lie de vin, également en forme d'arc de cercle, pincée à ses extrémités ; mais à concavité orientée vers le sommet.

13. — *Une couche d'arène* : de 30 cm d'allure à peu près semblable aux zones 10 et 11.

14. — *Une zone brune*, rougeâtre, argileuse, très foncée, de couleur évoquant celle de la limonite, contenant des blocs de granite roulés et de microgranite. Ces blocs ont la grosseur d'un œuf et sont très altérés, au point de se désagréger sous la pression des doigts.

15. — *Suit une importante zone arénisée* : avec 13 traînées horizontales et parallèles de matériel plus fin. Une distance de 5 à 10 cm les sépare les unes des autres.

La dégradation des feldspaths est très accusée. Cette zone se caractérise par une couleur plus sombre que celle de l'arène de base. Peut-être, y a-t-il eu entraînement des feldspaths calco-sodiques dissous. De plus, celle-ci se distingue aisément sur le terrain de l'ensemble des couches décrites par une stratification quasi horizontale, absolument remarquable pour du matériel granitique ; le pendage de cette formation oscille sur tout le front de la carrière entre 3 à 6 p. 100.

16. — *La coupe de Brassy se termine par une puissante zone d'arène* : très dégradée, exploitée par les entrepreneurs de la région, à éléments plus grossiers que ceux de la zone immédiatement supérieure.

Soulignons une fois encore que sa couleur blanchâtre due aux feldspaths calco-sodiques altérés la distingue nettement de cette dernière.

On peut en voir, emprisonnés dans l'arène, de forme arrondie, avec

des feldspaths calco-sodiques, entièrement dissous, réduits à l'état de poudre blanchâtre. Leur dégradation est intense. Le contraste est très vif entre l'aplite à éléments fins résistants et le granite porphyroïde.

Particularités de cette arène.

Cette formation est traversée par un filon d'aplite, d'abord unique, à la base de la carrière mais qui se divise ensuite en deux branches : l'une presque horizontale, de 30 à 40 cm d'épaisseur, non visible sur toute l'étendue de la coupe car elle est masquée par l'arène ; à son extrémité, l'aplite passe au microgranite ; la seconde branche s'élève dans l'arène à peu près verticalement et va mourir au contact de la zone stratifiée où elle est nettement tronquée.

Notons l'intense altération de cette partie du filon ; malgré son grain très fin, il est aussi pulvérisé que le granite qu'il traverse.

La partie supérieure de cette arène est tout à fait remarquable. On note de haut en bas :

a) Une zone jaunâtre de 20 cm, légèrement bombée au-dessus du filon d'aplite et en faible déclivité vers l'est.

b) Une zone diaclasée à feldspaths argilisés.

c) Une zone lie de vin dont le contour est calqué sur (*a*) et (*b*) de 4 à 5 cm.

d) A droite du filon une zone rubéfiée de 70 cm d'épaisseur qui tranche sur la couleur blanc grisâtre de l'ensemble de l'arène.

e) Elle repose sur une fine zone bistre, de nature argileuse.

A l'intérieur de l'arène, on remarque la présence d'une enclave de nature granitique, entièrement pourrie, et qui représente sans doute une ancienne boule ; elle occupe en effet la partie supérieure de la zone arénisée du granite originel.

Au contact de l'arène se développe une auréole plus ou moins rougeâtre où s'accumulent des produits ferrugineux. De telles auréoles peuvent être observées également autour d'enclaves figées dans les schistes cristallins ; c'est ainsi que dans la région de Condat (Cantal) une enclave de nature difficile à préciser en raison de son altération totale développe au contact des gneiss une première auréole de couleur verte à laquelle succède une seconde teinte ocre.

Enfin, l'arène est parcourue par un système de diaclases, intimement anastomosées, d'épaisseur variable, où la circulation des eaux, particulièrement intense, accélère la dégradation de la roche, et où se concentrent dans les unes les plagioclases argilisées, dans d'autres des produits limoniteux ocres, ou des oxydes de manganèse sous forme de larges plages noires, ou sous forme de fines arborescences dendritiques.

Groupement des zones précédemment décrites.

Cet ensemble peut être groupé plus simplement en trois parties distinctes.

1° *La partie supérieure* : (de surface à la zone 14 inclus) de 3,20 m de puissance totale environ. Il s'agit — la description détaillée le montre — d'un complexe très hétérogène de matériaux de toutes dimensions, depuis une argile franchement brun rougeâtre, à la base de la formation jusqu'à des cailloutis et graviers, en passant par des éléments de grosseur intermédiaire, de couleur lie de vin.

Cet ensemble tourmenté évoque des phénomènes périglaciaires avec leurs manifestations classiques : solifluxion, cryoturbation, plications.

2° *La partie intermédiaire* comprend seulement la zone 15 d'environ 3,30 m d'épaisseur. Il s'agit toujours de matériel granitique, mais régulièrement ordonnancé et non affecté par les remaniements périglaciaires.

3° *La base de la carrière* : (zone 16). Elle a 4,50 m de puissance et représente la zone d'altération du socle granitique. Il est très important de rappeler qu'elle est traversée par un filon d'aplite vertical, ceci démontre qu'elle n'a pas subi de transports. Ce filon ne pénètre pas dans la partie intermédiaire.

b) **Description d'une carrière à la sortie de Saint-Brisson**

Sur la route de St-Brisson à Saulieu, à 1 km au-delà du bourg de St-Brisson, s'ouvre une carrière d'arène granitique très intéressante. Nous sommes ici au cœur du Morvan, dans une région plate où l'altitude atteint 680 m, supérieure à la moyenne générale de l'ensemble du massif.

Du sommet à la base de la carrière, nous observons les zones suivantes :

1° *Un sol* : comprenant d'abord un horizon A_0, noir, humifère de 5 cm, où végètent Pteris aquilina, de grande taille et Sarothammus Scoparius, traduisant un pH de l'ordre de 5-5,2.

Puis vient un horizon A_1, de couleur grise de 20 cm, d'éléments assez fins, peu de cailloux et graviers.

2° *Une zone arénisée* (1,25 m de puissance) contenant de nombreux blocs granitiques, anguleux, plus ou moins altérés, noyés dans une arène fine, très pulvérisée. Cette zone est bien caractérisée par sa teinte grise, voisine de celle de l'horizon A_1, et par la finesse de ses éléments.

A Brassy, nous avons déjà signalé la présence d'une telle formation où les feldspaths calco-sodiques réduits à une poudre blanchâtre du fait de l'altération, ont dû être entraînés.

3° *Une bande de cailloutis et graviers* : de 5 cm d'épaisseur dessinant de molles ondulations.

4° *Une zone rouge brique* à particules très fines, de *nature argileuse*, de 3 à 4 cm d'épaisseur, calquée sur la zone à cailloutis, festonnée par conséquent, pincée à l'une de ses extrémités.

5° A la base, *une importante zone d'arène* (2 m visible sur la coupe considérée), contenant des éléments nettement plus gros que ceux de la zone (2). Le granite porphyroïde, très dégradé, s'effrite sous la pression des doigts. Les feldspaths calco-sodiques apparaissent avec leur couleur blanchâtre, alors que les feldspaths potassiques présentent leur craquelure caractéristique ; ces remarques ont une portée générale s'appliquant à toutes les zones de contact granite porphyroïde de Lormes et arène.

Absence de blocs dans cette zone (5), et pas de filons la recoupant.

Par contre, notons dans cette arène, la présence de nombreuses traînées rouges argileuses, semblables à la partie (4) déjà décrite. Elles sont d'abord parallèles entre elles, légèrement festonnées, discontinues, puis à la base, elles affectent une allure courbe et plongent dans l'arène profonde. Elles sont à rapprocher des phénomènes d'involution argileuse entre limons et les sables de Limagne dans les couches de Sarliève.

A l'encontre de la coupe de Brassy, nous n'observons pas à St-Brisson, de loupe de glissement ; cependant il faut insister sur la présence de ces zones de cailloutis et de bandes argileuses, dessinant des festons (ce sont des plications) qui, malgré leur faible amplitude, dénotent eux aussi des *phénomènes de transport.*

Ces derniers ne sont donc pas localisés et en précisant que les communes de St-Brisson et de Brassy sont distantes d'une vingtaine de kilomètres, on soulignera par là-même toute leur importance.

c, d, e,) Autres observations des phénomènes de transport dans le Morvan-Nord.

Les manifestations périglaciaires de faible intensité vues à St-Brisson, se retrouvent encore sur la route reliant Lormes à St-André-en-Morvan, non loin du contact granite porphyroïde-Anatexite à Cordiérite. Au sein d'une couche d'arène de 2 m de puissance environ on relève des déformations aux *plications* dessinées par des zones à caractères argileux. Les mêmes remarques ont été formulées par J. POUQUET autour de Dun-les-Places.

Mais, les plus belles cryoturbations se rencontrent sur la route Planchez-Montsauche, à 2 km au sud de cette localité, ayant affecté des couches argileuses, bleutées et ocres, disposées au sein d'une arène grossière et sur la route Montsauche-Saulieu (borne 66) à 2,5 km au-delà de Montsauche, où les phénomènes sont tout à fait identiques.

L'AGE DES MANIFESTATIONS PÉRIGLACIAIRES DANS LE MORVAN

Les analyses physiques et granulométriques de Brassy nous ont amené à conclure que la partie supérieure de la carrière avait sans doute servi de surface de glissement pour celles qui les recouvrent grâce à seé propriétés lubrifiantes dues à sa richesse en éléments fins, et avait favoriss les phénomènes de solifluxion. Elles ont aussi permis de montrer comment les diverses couches (zones 2 à 13) s'étaient empilées successivement les unes sur les autres avec une vitesse réduite. Les alternances de gel et de dégel ont par la suite [modifié la disposition primitive des couches solifluées : plications, loupes de glissement, et cryoturbation ont façonné l'architecture définitive de toute la formation considérée.

Ces manifestations périglaciaires, apparues sous un climat rigoureux, ont été signalées et décrites en détail dans de nombreuses régions de l'Europe Occidentale, et ont affecté des formations géologiques très variées. Uniquement en France, des centaines de travaux ont vu le jour sur ces questions depuis une dizaine d'années. Aussi, n'est-il pas possible de citer ici toutes les références ; nous nous limiterons simplement à mentionner l'œuvre de J. Tricart et A. Cailleux (1950 et 1956) ayant une portée générale sur l'ensemble des phénomènes périglaciaires.Citons aussi les études régionales de A. Rudel sur la Limagne (1949), de P. Bout en 1949, faisant état de la fréquence des dépôts soliflués sur les flancs des buttes volcaniques du Velay, de Ph. Pinchemel retrouvant ces mêmes dépôts dans le pays de Thelle sur le rebord du Bray, carrière de Flavacourt, de R. Ciry (1953), décrivant les éboulis dus aux actions périglaciaires dans les environs de Dijon, de P. Rat (1953), retraçant ces mêmes phénomènes dans le Chatillonnais, de G. Mazenot (1956), dans le Mont d'Or Lyonnais. Ces transports sont d'une netteté saisissante dans le sud-est de l'Angleterre, dans la région des North-Downs, près de Farnham (carrière de Upper-Hale) et Y. Guillien (1955) a reproduit dans une de ses publications de splendides clichés dus à Th. Van Den Hammen, montrant des couches tourbeuses plissotées incluses dans les sables d'Apeldoorn aux Pays-Bas.

La découverte d'archives paléontologiques, surtout floristiques (grains de pollens et spores) assez bien conservées dans certaines assises touchées par une solifluxion s'opérant à vitesse réduite, est venue éclairer les chercheurs sur l'époque où se sont déroulés ces événements généralisés. Grâce à leur dépouillement minutieux, ils ont pu dresser des diagrammes polliniques, précieux tableaux où sont inscrites les vicissitudes des diverses espèces, en fonction des données climatiques et où la sagacité des auteurs s'est efforcée de découvrir des indications chronologiques pour les temps quaternaires.

De l'application des méthodes de la science palynologique qui a fait un sérieux pas en avant, VAN DER VLEK, F. FLORSCHÜTZ, GRITCHOUK (1950) et Y. GUILLIEN (1955) inclinent à placer les actions périglaciaires observées dans l'Europe, à la fin du Würmien. Rien n'interdit d'imaginer que les phénomènes dont le Morvan fut le théâtre, ne se soient pas déroulés à cette époque. Les géologues prédécemment cités ayant travaillé en Auvergne et en Bourgogne datent aussi les influences périglaciaires du Würmien. Une note toute récente de A. RUDEL et G. LEMÉE (1955) viendrait encore à l'appui de cette hypothèse, car ils attribuent également au Würmien supérieur ou Tardiglaciaire les diverses perturbations remaniant les courbes de Sarlève près de Clermont-Ferrand : sols polygonaux, poches de cryoturbation, involutions argileuses, ces dernières remarquées dans l'arène de St-Brisson et dans la région de Montsauche.

CHAPITRE IV

ÉTUDE D'UNE CARRIÈRE D'ARÈNE SUR GRANITE PORPHYROÏDE DU MORVAN-NORD

Coupe de l'Abattoir à la sortie de Lormes
(Coordonnées EM 1 /80 000 : 721,4 × 256,4)

DESCRIPTION DE LA COUPE

Elle est située sur le côté gauche de la route Lormes-Avallon, à 300 m de la sortie de Lormes ; cette importante coupe en région plate permet d'observer la décomposition typique du granite porphyroïde.

A. — Partie gauche de la carrière.

Du sommet à la base, on rencontre :

1° *Un sol* forestier comprenant :

a) Un horizon A_0 peu épais (2 à 5 cm) humifère. La végétation arbustive est assez chétive : le hêtre ne s'y développe qu'avec difficulté ; le charme n'existe pas, alors qu'il est parfaitement acclimaté sur les sols voisins reposant sur socle anatexitique ou sur un mélange anatexite-granite-microgranite (type Empury-St-André-en-Morvan).

b) Un horizon A_1, sableux, très pulvérisé (15-25 cm), passant sans transition bien marquée à l'arène proprement dite.

2° *Une zone d'arène* C_0, d'environ 6 m d'épaisseur, de couleur claire, contenant de grosses boules de granite plus ou moins altérées. Celles-ci sont surtout nombreuses près du sommet, et leur chute entraînant à chaque fois une certaine proportion de matériel arénisé, constitue au pied de la coupe un petit talus d'éboulis.

B. — Partie droite de la carrière.

Hauteur approximative : 4,50 m. Elle est constituée d'arène, mais on note le passage d'un filon ellipsoïdal d'aplite très altérée, ayant tendance à passer au microgranite.

Remarquons que dans leur section visible, aucune de ces coupes ne découvre la roche-mère. On peut la récolter à quelques dizaines de mètres en amont de la carrière, où elle affleure largement, entaillée par d'énormes diaclases de 4 à 5 cm d'épaisseur mais où elle a conservé sa dureté.

Le passage d'un filon prouve que la formation observée est en place dans sa partie droite où les échantillons ont été récoltés. Quant à la partie gauche, l'alignement régulier de certains cristaux de microcline invoque des phénomènes de transport très atténués suivis probablement d'effets de tassement.

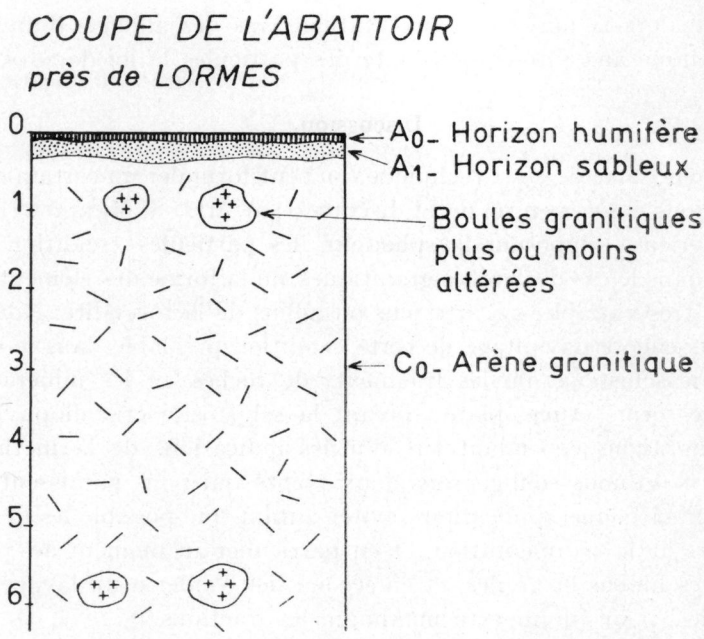


Schéma 2.

I. — L'ALTÉRATION PHYSIQUE DANS LE PROFIL DE L'ABATTOIR

A. — Constitution physique de la coupe.

Technique employée.

Nous avons utilisé le procédé pipette de ROBINSON avec classement des diverses fractions selon l'échelle conventionnelle proposée par l'Association Internationale de la Science du Sol (1926), savoir :

	Dimension des particules
Argile	$d < 2\ \mu$
Limon	$2 < d < 20\ \mu$
Sable fin	$20 < d < 200\ \mu$
Sable grossier	$200 < d < 2\,000\ \mu$
Cailloux + graviers	$d > 2$ mm

Les cailloux et graviers ont été séparés par tamisage par passage au tamis de 2 mm. La partie fine (fraction inférieure à 2 mm) est traitée à l'eau oxygénée à 120 volumes pour détruire la matière organique, puis à ClH N/20, lavée à l'eau distillée pour éliminer l'acide. Enfin, elle est agitée mécaniquement durant 1 heure avec 500 cm³ d'ammoniaque à 1 p. 100, afin de détruire les agrégats et de libérer les particules élémentaires.

Suit alors la mise en sédimentation dans des allonges d'un litre et l'on applique aux vitesses de chute des particules la loi de STOCKES.

Discussion.

A l'encontre de cette technique, on peut formuler un certain nombre d'objections passées en revue et discutées par Mme S. MÉRIAUX (1953) ; la plus sérieuse supposant la sphéricité des particules, condition jamais réalisée dans le cas des arènes granitiques, où la forme des éléments constituants très variable, s'écarte plus ou moins de la rotondité. Nous nous éloignons encore davantage de cette condition préalable dans le cas des gores micaschisteux, où les fragments de roches, et les minéraux ont tous une forme étirée, plate, suivant la schistosité cristallophyllienne.

Nous avons cependant tiré d'utiles indications de la méthode de ROBINSON, et nous soulignerons deux points qui nous paraissent essentiels pour sa bonne application : éviter autant que possible les perturbations lors de la sédimentation, et en particulier au moment des prélèvements des limons et argiles, et en second lieu veiller à un lavage soigné des sables, pour éliminer au maximum les fractions $< 20\ \mu$.

Dosage des matières organiques.

(Technique de KJELDAHL).

La prise d'essai (5 g d'arène ou de sol) est attaquée par SO_4H_2 concentré + SO_4Cu jusqu'à ce que le liquide surnageant soit limpide (environ 7 h). L'ammoniaque est déplacée par un excès de NaOH et recueillie dans une liqueur titrée d'SO_4H_2.

$$\textit{Matières organiques } p.\ 100 = N_2\ p.\ 100 \times 20$$

Analyse mécanique des différents horizons du profil de l'Abattoir.

Numéro des échantillons dans notre nomenclature	Notation des horizons	Profondeur en mètres	Cailloux et graviers pour cent d'arène ou de terre totale
595	A_0	0,03 m - 0,05 m	23,80
594	A_1	0,25 m	28,26
593	C_0	2,50 m	48,64
592		3,50 m	38,88
591		5 m	41,17

Constitution physique de la terre fine d < 2 mm.

N°	pH	Terre fine %	% de terre fine séchée à 105°						
			Argile < 2 μ	Limon 2-20 μ	Sables fins 20-200 μ	Sables grossiers 200-2 000 μ	Matières organiques	CO_3Ca	Total
595	4,7	76,20	15,35	20,30	17,90	44,88	1,44	0	99,87
594	5,0	72,74	15,35	21,85	17,08	43,67	1,70	0	99,65
593	5,0	52,36	16,95	11,45	18,84	53,36	tr.	0	100,50
592	5,2	61,12	13,15	9,55	17,16	61,11	tr.	0	100,97
591	5,3	58,83	13,55	6,55	19,49	60,54	0,0	0	99,93

A titre de comparaison, nous pouvons citer 2 analyses physiques se rapportant à la carrière d'arène de Brassy (X = 716,2 ; Y = 252).

N°	Profondeur	Horizons	pH	Terre fine	% de terre fine séchée à 105°			
					Argile	Limon	Sables fins	Sables grossiers
1	5-10 cm	A_0	4,7	74	12,1	17,3	20,40	47,30
19	9 m	C_0	4,9	83,8	3,9	13,3	36,00	46,80

Les résultats analytiques confirment les observations effectuées sur le terrain, savoir que l'arénisation s'effectue d'une façon désordonnée, et que la teneur des diverses fractions peut varier dans de plus ou moins grandes proportions d'un point à un autre.

Cependant, nous pouvons tirer les remarques suivantes :

1° La pulvérisation mécanique très importante dans le cas de ce granite, s'accentue progressivement au fur et à mesure que l'on s'élève dans le profil. Ceci apparaîtra d'ailleurs de façon plus claire à la suite des analyses granulométriques.

La proportion des éléments < 2 mm passe de 58,83 à 76,20 p. 100, les fractions fines s'élèvent, alors que les sables grossiers diminuent de 60,54 p. 100 à 44,88 p. 100.

2° Les horizons A_0 et A_1 se distinguent de C_0 par la présence de matières organiques rencontrées seulement à l'état de traces dans l'arène.

3° Il y a une analogie remarquable dans la constitution physique des horizons A_0 et A_1, et effectivement A_0 tranche à peine sur A_1, tant sa couleur est voisine.

4° La fraction argile < 2 μ présente dans le sol 15 p. 100 de la terre fine, et rend compte en même temps que de l'ultime dégradation physique, des réactions chimiques complexes, en cours d'altération, depuis la roche-mère jusqu'à la surface, et conduisant à l'élaboration de produits nouveaux.

L'absence d'horizon B dans les sols granitiques du Morvan-Nord.

Tout comme dans les sols granitiques d'Auvergne étudiés par D. COLLIER, nous n'avons pas observé à Lormes, pas plus que dans les autres carrières du Morvan-Nord, la présence d'horizon B où s'accumulent les complexes alumino-ferro-siliciques, qui ont quitté les horizons éluviaux. Pourtant un certain nombre de facteurs favorables à la podzolisation se trouvent ici réunis : nous avons un sol forestier à pH = 4,7 avec une végétation comprenant Pteris aquilina, Sarothammus scoparius, et de jeunes Quercus pedonculata, reposant sur une arène par définition perméable et dans une région relativement humide. Certes, des migrations d'argile et de fer, ont lieu, puisqu'on décèle ces produits accumulés le long des fissures à l'intérieur de l'arène. Il est probable que la perméabilité très élevée de ces formations meubles à tous les niveaux des diverses coupes, perméabilité encore accrue par le réseau des diaclases, est responsable de la non accumulation des substances migratrices incapables de se concentrer pour constituer un horizon bien défini, et entraînées par l'intense circulation des eaux au sein de l'arène. Il n'est pas impossible d'imaginer que les produits bloqués le long des fissures représentent peut-être les fragments d'un horizon B, très peu épais, complètement dissocié, et qui n'a pu demeurer en place.

B. — Analyse granulométrique.

Elles ont été effectuées selon les méthodes utilisées au Laboratoire de Géographie de la Faculté des Lettres de Dijon (1955), lesquelles s'inspirent des travaux de KRUMBEIN-PETITJOHN (1938) et Gérard BILLY (1954). Le tableau ci-dessous contient les principaux paramètres déterminés à la suite de la pesée des refus sur 9 tamis successifs (2 mm à 80 μ) et construction des courbes cumulatives.

N° échantillons	$\bar{X}$ (en mm)	Md (en mm)	SO	K	σ_z	AS
591	1,25	1,92	1,692	0,321	3,55	+ 1,52
592	1,40	2,15	1,660	0,321	3,30	+ 1,63
593	1,14	1,37	1,996	0,367	4,0	+ 0,60
594	0,510	0,760	2,291	0,272	6,05	+ 0,843
595	0,420	0,650	3,39	0,244	7,3	+ 0,822

Ces analyses mettent bien en lumière le développement de l'altération physique globale depuis l'arène jusqu'au sol, les valeurs de la médiane (Md) et de la moyenne géométrique (X) diminuant progressivement de 3 fois environ de l'horizon C_0 à A_0 ; d'autre part, comme dans le cas de la carrière de Brassy (1956), l'hétérogénéité existant à l'intérieur même

des prélèvements, se traduit par un écart entre la valeur de la médiane et celle de la moyenne géométrique, la première Md étant constamment plus élevée que la seconde, et ceci fixant pour les asymétries un signe toujours positif, et des valeurs relativement élevées. L'écart le plus net est celui de l'échantillon 592 : 0,750 mm, As = + 1,63.

La partie centrale des distributions, assez homogène pour l'arène, cesse de le devenir pour les horizons A_1 et A_0. Quant au coefficient K, rapport de la partie centrale de la distribution (entre 25 et 75 p. 100) à la courbe comprise entre P_{90} et P_{10} il ne subit que des oscillations de faible amplitude.

En conclusion, l'altération physique du granite de Lormes s'exerce sur un matériel grossier très hétérogène (base de C_0) pour donner un sol aux particules de dimensions moyennes.

C. — Étude minéralogique de chaque horizon de la carrière de l'Abattoir.

Le granite altéré. Zone C_1. Échantillon R. 60.

Le granite altéré se caractérise surtout par son extrême friabilité, s'effritant sous la simple pression des doigts, et se réduisant très facilement en arène. Les minéraux perdent aussi leur éclat, et deviennent ternes.

Etudions leur comportement optique à l'aide du microscope polarisant. Cette roche pourtant très dégradée présente une structure microscopique aussi nette qu'à l'état frais.

Observation de la lame mince — N° 6 172.

Quartz.

Ses propriétés optiques demeurent inchangées, tout comme dans le granite frais. Notons cependant un élargissement des cassures qui affectent plusieurs de ses cristaux et dans lesquelles — tout comme d'ailleurs dans les interstices libres entre les plages de la roche — circulent des produits limoniteux rougeâtres qui s'éteignent entre nicols croisés, accompagnés de fins granules de minéraux opaques.

Oligoclase (An 20).

C'est le minéral le plus sensible à l'altération et le seul déjà réduit en poudre dans l'échantillon examiné. Mais celle-ci agit toujours de façon désordonnée. Certaines plages conservent leur fraîcheur initiale, dans d'autres, la Damourite envahit les clivages, et dans l'une d'elles cette transformation est totalement achevée, à telle enseigne que l'on ne reconnaît plus sa trame.

Microcline anorthose.

Aucune modification morphologique, mise à part la disparition du caractère chatoyant typique présenté par le quadrillage de ce cristal.

Biotite.

Macroscopiquement, certaines plages ont une teinte plus ou moins mordorée. Au microscope, on relève une grande variabilité de comportement.

A côté de plages presque intactes, disséminées dans toute la lame, on arrive par toute une gamme de faciès à des plages où la chloritisation est intense suivie, d'autre part, par une déferritisation de la bictite. Les clivages sont alors remplis d'un exsudat noirâtre de fer sous forme d'ilménite, tantôt en petites ponctuations, tantôt en aiguilles allongées. L'oligiste développe également des traînées rougeâtres.

En somme, il n'y a pas analogie totale entre les aspects macroscopique et microscopique de cette roche fraîche et altérée. La conservation de la structure est complète ; les modifications affectent surtout les plagioclases et la biotite, les plus vulnérables au point de vue chimique.

Nous avons eu l'occasion d'étudier au microscope un autre granite, situé dans une région tout à fait différente, puisqu'il s'agit du granite de la Côte des Laurent, à proximité de Sansac-de-Marmiesse, dans le Cantal. L'observation des lames minces 5 774 (roche très dure) et 5 775 (roche très pourrie) ne montre que des différences assez insensibles ; la saussuritisation des feldspaths calco-sodiques, déjà commencée dans l'échantillon frais s'accentue ; la transformation qui débute dans les clivages s'irradie et gagne l'ensemble du cristal ; quant à la Biotite, elle a le même devenir qu'à Lormes. Ces conclusions sont donc bien concordantes.

L'Arène. Zone C_0.

Échantillons 591-592-593.

Nous devons examiner successivement les fractions isolées lors de l'analyse physique graviers-sables-limons et argile.

I. — Graviers et sables.

Étude à la loupe binoculaire.

Technique utilisée.

Chaque prélèvement est agité dans une colonne de 11 tamis dont les dimensions des mailles vont de 80 μ à 5 mm, suivant la progression Afnor. Les examens s'effectuent sur les refus de ces différents tamis au

moyen de la loupe binoculaire, exception faite toutefois de la fraction inférieure à 80 μ, dont les particules sont trop fines pour être alors identifiées.

D'autre part, ces observations sont contrôlées par l'examen de ces mêmes prélèvements mis en sédimentation, après dispersion par NH_3. Les fragments de roches et les minéraux sont décapés, ce qui facilite leur examen.

La loupe binoculaire permet d'étudier :

1° *La composition minéralogique*, surtout qualitative des échantillons de l'arène, une détermination quantitative s'avérant difficile et sujette à caution.

2° *La forme et le stade d'altération des constituants.*

3° *La grosseur à partir de laquelle il y a désagrégation des fragments de roches* en minéraux bien individualisés.

Étude de l'échantillon 591 (Arène profonde à 5 m de la surface).

Fraction 2 mm.

Son observation est facile même à l'œil nu, elle représente 42 p. 100 de l'échantillon, et une grande partie de ses minéraux est déjà bien individualisée. On note aussi quelques fragments de granite, et des associations Quartz-Biotite, et dans une moindre proportion, Microcline-Biotite.

Le quartz présente des cristaux de forme très variable. Absence totale de corpuscules émoussés. Nous n'avons jamais rencontré de grains arrondis, ni de stries sur les cristaux, pas plus que d'inclusions internes, autant d'arguments qui militent en faveur d'une altération sur place. Ces minéraux sont les uns très hyalins, brillants, translucides, au point de se confondre, lorsqu'ils ont une faible épaisseur, avec des lamelles de muscovite ; d'autres sont plus ternes et recouverts de traînées limoniteuses, traduction tangible d'une évolution du fer.

Le microcline est très abondant ; il développe de grands cristaux (2 cm de long pour quelques-uns d'entre eux), aux faces bien marquées. Ils sont creusés parfois de minuscules géodes où s'accumulent les plagioclases argilisées ; de rares paillettes de muscovite s'accolent au microcline, et sont l'indication de transport de faible amplitude, ce minéral étant totalement absent dans la roche-mère.

Plagioclases. Moins abondants que le quartz ; ils forment des agglomérats dissociés sous la pression de la pince, et dans lesquels ils englobent des lamelles de biotite.

Biotite. Peu abondante, fraîche, en lamelles d'un noir mat, feuillets de petite dimension.

Par ordre d'importance décroissante, nous classerons les minéraux comme suit : Microcline, Quartz, Feldspaths, Biotite.

Fraction 1,25-2 *mm.*

Les minéraux sont presque tous individualisés et ne diffèrent que très peu de ceux du granite frais — sauf les plagioclases —. Toujours la même variabilité dans les faciès du quartz ; on peut observer sur l'un d'eux le passage d'une zone hyaline à une zone légèrement enfumée.

La biotite est plus abondante, mais son degré d'altération encore imperceptible. Signalons l'empilement des feuillets pg_1, dont l'ensemble constitue une représentation parfaite du prisme monoclinique. Ces derniers sont légèrement touchés par les agents de l'altération dans leur partie supérieure, mais le centre du cristal est intact.

La fraction 800 μ - 1,25 *mm* contient encore des associations plagioclases-biotite ou quartz-microcline, mais au stade suivant 500-800 tous les minéraux son bien séparés. La proportion de biotite augmente, de même que son état d'altération, d'origine mécanique (écartement visible des feuillets où s'infiltre l'eau) et d'origine chimique (décoloration des cristaux qui prennent une teinte assez mordorée).

Nous retrouvons encore quelques paillettes de muscovite.

Dans la fraction 315-500 μ, nous relevons la présence de débris végétaux qui ont migré, grâce aux diaclases, à 5 m de profondeur. Leur rôle est sûrement efficace dans les phénomènes d'altération, car les acides humiques sécrétés augmentent le pouvoir corrosif des solutions circulant dans l'arène.

Dans les fractions fines $< 200\ \mu$ correspondant aux sables fins, les grains de quartz sont d'une grande transparence, et avec des faces tranchantes. La proportion du microcline diminue, au profit des plagioclases pulvérisés et de la biotite qui se concentre ; en même temps, son altération progresse ; il y a fragmentation des assemblages cristallins en lamelles ou fines paillettes, sensibles par toutes leurs faces aux coups de l'altération. Quelques rares cristaux de muscovite.

Échantillon n° 592 (3,50 m de la surface).

Les observations sont les mêmes que pour l'échantillon précédent.

Les fractions grossières, très importantes, montrent les mêmes assemblages de cristaux. La biotite, peu abondante, est plaquée sur les microclines ou les plagioclases réduits en une purée qui se dissémine sur toutes les plages. Certains quartz sont d'une transparence remarquable.

Dans la fraction 500-800 μ, retenons la présence d'un très beau cristal de tourmaline noire ; c'est aussi à ce stade que s'individualisent les minéraux, leurs associations constituant désormais l'exception.

Augmentation de la teneur en biotite dans les parties fines ; l'altération débute à l'extérieur du cristal et se dirige vers le centre.

Échantillon nº 593 (2,50 m de la surface).

Remarques identiques en ce qui concerne le comportement des minéraux. Les derniers sont à peu près tous individualisés au stade 800 μ-1,25 mm. La biotite paraît dans un état d'altération plus poussé que dans les pulvérisations en zone profonde, et certaines plages sont entièrement décolorées.

La muscovite se rencontre, absolument intacte, sans dégradation, très brillante, sous forme de longues paillettes dans les refus des tamis :

800-1,25 mm.

315-500 μ.

200-315 μ.

Remarques générales sur les graviers et sables.

Nous pouvons résumer sous les rubriques suivantes les caractéristiques minéralogiques de l'arène C_0.

1º Forme très hétérogène des cristaux ; pas de corpuscules arrondis, ni émoussés.

2º Grande variabilité des faciès du quartz. Celui-ci et le microcline constituent les éléments majeurs des fractions grossières, et sont les plus résistants.

3º Les plagioclases sont dans un état de dégradation extrême ; ils se décomposent avant la biotite, contrairement au point de vue de certains auteurs, comme P. Birot, laquelle demeure intacte jusqu'aux alentours du stade 800 μ-1,25 mm ; elle se concentre dans les fractions fines et son altération s'accélère au fur et à mesure que le diamètre de ses cristaux diminue.

4º La présence de muscovite et de tourmaline indique un apport granulitique qui s'est incorporé à l'arène et dont il faut rechercher l'origine dans les filons recoupant le granite.

Il semble que ces remarques aient une portée assez générale dans le Morvan-Nord. Nous les avions formulées avec M. Sajot et J. André dans la description de l'arène de Brassy où nous notions aussi la présence de muscovite et de tourmaline. Il nous a été possible d'observer également l'arénisation de ce même granite sur une tranchée de 4 m de profondeur ouverte par le Bureau des Recherches géologiques et géophysiques, qui recherchait les digitations d'un massif de greisen chargé de wolfran. Les proportions relatives des minéraux sont très voisines, et la tourmaline est assez abondante dans la fraction $<$ 2 mm.

Constitution minéralogique des sables (Échantillon nº 593).

Nous donnerons plus loin les analyses chimiques totales des sables grossiers, nº 5 931 (An. Y. Chaleil nº 662) et des sables fins nº 5 932

(An. Y. CHALEIL nº 669) extraits de l'arène. Voici les constitutions minéralogiques que nous pouvons calculer à partir de ces analyses, et qui confirment dans l'ensemble les observations à la loupe binoculaire.

Minéraux formés	Sables grossiers nº 5 931	Sables fins nº 5 932
H_2O totale	2,95	7,90
Apatite	0,28	0,27
Ilménite	1,02	1,67
Magnétite	0,34	1,07
Biotite	5,20	6,23
Corindon	9,16	22,47
Microline	34,09	21,16
Oligoclase	9,06	15,74
Quartz	37,40	24,00
	100,00	100,51

II. — La fraction limon (20 μ-2 μ).

L'étude de cette fraction à l'aide du microscope polarisant est très délicate, eu égard à la petitesse des cristaux qui de plus ont tendance à s'agglomérer — malgré une dispersion préalable à NH_3.

Le matériel monté dans une goutte d'eau entre lame et lamelle est ainsi constitué :

Quartz : Son importance diminue par rapport à celle qu'il occupait dans les sables. La forme des cristaux est très variable ; une partie d'entre eux se caractérisent par une extinction très franche.

Feldspaths : On n'observe qu'une fine poussière blanchâtre et il est impossible de discerner le microcline des feldspaths calco-alcalins.

Biotite : Élément important, en plages allongées ou rectangulaires, rognées sur les bords, de couleur brun clair, à faible polychroïsme.

III. — La fraction argile (particules < 2 μ).

Extraction de la fraction argile.

Dans tous les cas, la fraction colloïdale a été extraite suivant la méthode internationale d'analyses physiques des sols, après dispersion à NH_4OH durant 1 heure et sédimentation dans des allonges durant 8 heures. La dispersion par NaOH n'a pas été retenue dans ce travail, certains échantillons devant être soumis ultérieurement à l'analyse chimique, où l'apport de Na aurait faussé les résultats et gêné également l'interprétation des données de l'analyse thermique différentielle. Selon Mlle S. CAILLÈRE et S. HENIN, cette méthode d'extraction ne modifie pas les caractéristiques des argiles ; ces minéraux, ajoutent les auteurs, « pouvant sortir sans grand dommage du point de vue de leur structure, de traitements encore plus énergiques » (Cf. *Ann. Agro.* 1947, nº 1, p. 70).

Cette sédimentation permet de recueillir, d'après la loi de STOCKES, des particules $< 2\ \mu$. Nous aurions pu prolonger le temps de chute des particules jusqu'à 96 heures, extrayant alors ce que les agronomes, notamment E. BASTISSE (1947) nomment « l'argile fine ». Mais les travaux de G. MILLOT (1949) ont démontré que plus la finesse des particules s'élevait, moins nets étaient les résultats des analyses aux rayons X ; L. THIEBAULT, dès 1925, un peu en marge en la circonstance des vues de Mlle S. CAILLÈRE et S. HENIN, invoquait alors pour expliquer cette remarque la vulnérabilité accrue des minéraux aux traitements qu'ils subissent. D'autre part, BARSHAD (1948) a même signalé des transformations possibles de minéraux pour les particules inférieures à 1μ, notamment de biotite en vermiculite. Aussi n'avons-nous pas jugé utile d'effectuer de telles sédimentations prolongées qui n'avaient pas donné à ces chercheurs des résultats plus précis.

Détermination minéralogique de l'argile extraite de l'arène n° 593.

La détermination minéralogique de la fraction argile est certainement la plus longue et la plus délicate ; plusieurs méthodes sont à la disposition du chercheur et pour accroître la précision de son diagnostic, ce dernier a tout intérêt à confronter les résultats de plusieurs d'entre elles pour le même échantillon. Voici les techniques utilisées dans le cas qui nous préoccupe.

Analyse thermique différentielle.

Nous n'insisterons pas sur ce procédé d'investigation qui a donné lieu à de nombreuses publications, notamment de la part de R. WALLACH (1913), J. ORCEL, (1927), G. HIRNE et Charles LAMY (1951), Mlle CAILLÈRE et S. HENIN (1947 à 1951). C'est aux travaux des deux derniers auteurs que nous nous rapporterons pour l'interprétation des résultats.

Étude de la courbe (*S* 421). Elle présente un premier crochet endothermique bien marqué débutant vers 120° et finissant à 250°, correspondant au départ de l'eau hygroscopique de l'argile. Une seconde inflexion endothermique, de faible amplitude, est bien visible ensuite à 320°. Ce phénomène a donné lieu à diverses interprétations ; G. MILLOT (1949) l'attribue à la présence de minéraux de type hydrobiotite-vermiculite. Mais Mlle CAILLÈRE et S. HENIN (1947) avaient montré qu'il s'agissait d'hydrargillite ou de goethite. L'analyse chimique apportera une confirmation de cette hypothèse. Puis vient un troisième crochet endothermique en forme de V, largement ouvert, débutant à 500°, atteignant son développement maximum vers 600° pour disparaître à 700°, phénomène traduisant le départ de l'eau de constitution. Enfin, nous notons une

dernière inflexion de nature exothermique amorcée à 900° et maxima à 950°.

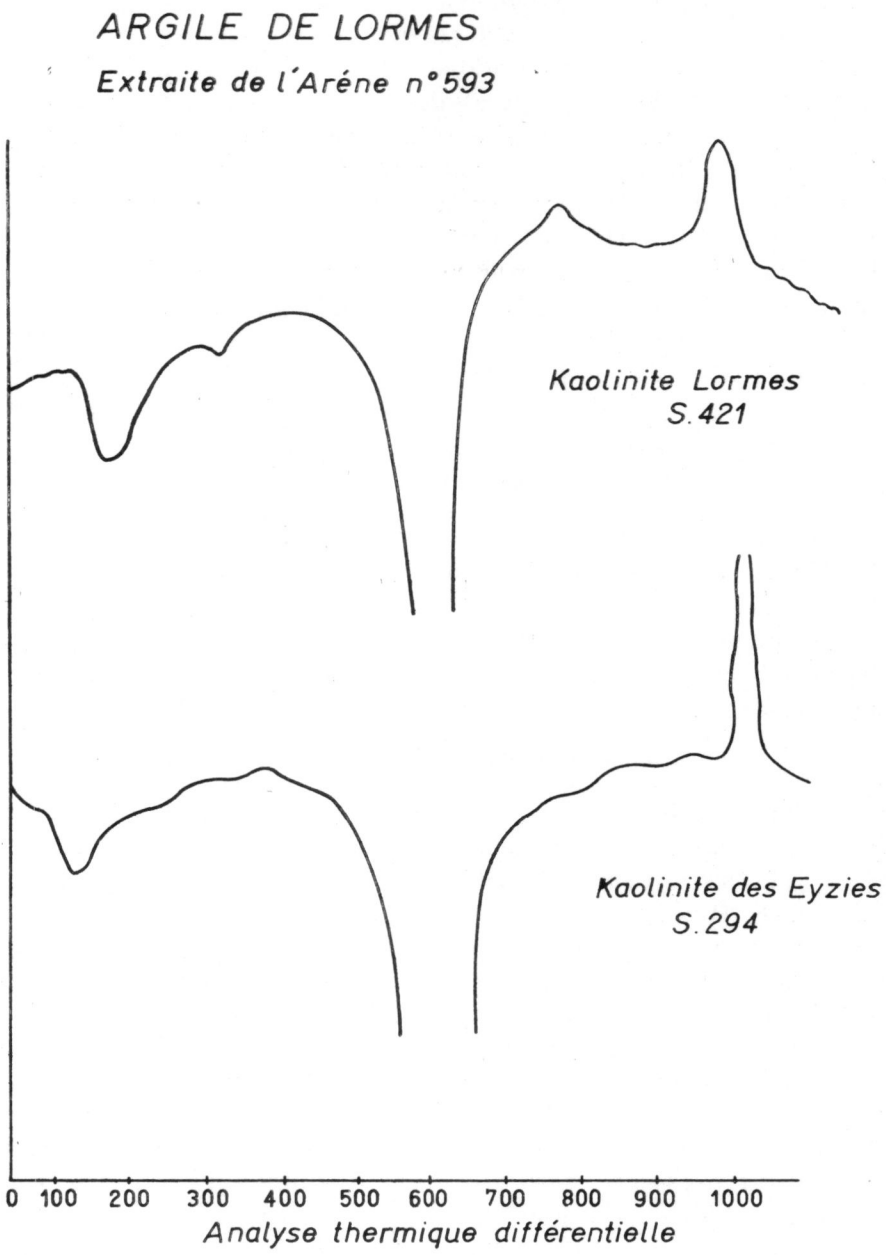


Schéma 3.

Une telle courbe, bien caractérisée par la présence de ces 2 crochets à 500, 600° et à 950°, permet de conclure à la nature essentiellement kaoli-

nique de l'échantillon. Elle est très proche de la courbe type de la kaolinite des Eyzies S. 294 étudiée au Muséum par Mlle CAILLÈRE.

2. — Détermination de l'eau de constitution.

Elle a été mentionnée lors de l'étude des diverses fractions granulométriques de l'arène (colloïdes 5 934). La perte au feu est de 13,20 p. 100. Ce résultat renforce l'idée de l'appartenance de cette argile aux kaolinites. La teneur en eau de constitution est un peu plus faible que celui du kaolin théorique : 13,91 p. 100, mais très proche de la kaolinite de KELLEY : 13,40 et surtout de la kaolinite de Von MEHMEL : 13,30 p. 100.

3. — Analyse chimique.

comparée à des argiles de type kaolinique net citées par E. BASTISSE (1947).

Constituants chimiques	Argile Lormes Analyse 514 Y. CHALEIL-J. DEJOU mai 1956	Kaolin théorique par calcul	Kaolinite 286 Mission KILIAN SCAETTA Ann. Agro. 1947 mai-juin (p. 425)	Argile de la terre de groie rouge de la Vienne (E. BASTISSE) nº 6 Ann. Agro. 1947, mai-juin (p. 429)
H_2O^-	2,50			
H_2O^+	13,20	13,91	14,15	13,50
SiO_2	42,55	46,60	41,15	44,45
Al_2O_3	35,85	39,49	35,37	30,50
Fe_2O_3	5,05		8,23	8,50
FeO	tr.		—	
P_2O_5	0,00		—	
TiO_2	0,25			
MnO	tr.			
CaO	tr.		0,31	0,60
MgO	0,80		0,13	2,15
K_2O	0,70		0,24	0,66
Na_2O	0,05		0,33	0,30
Total	100,95		99,91	100,66
Bases totales	1,55	—	1,01	3,71
Rapports moléculaires	$\frac{R_2O_3}{SiO_2} = 1,85.$	2,00	1,71	2,30
	$\frac{H_2O}{R_2O_3} = 2,27$	2,00	1,71	2,30
	$\frac{Bases}{R_2O_3} = 0,07$	—	0,97	0,19
$R_2O_3 = Al_2O_3 + Fe_2O_3$.	$\frac{Fe_2O_3}{R_2O_3} = 0,082$	—	0,14	0,03

Les rapports moléculaires sont très voisins de ceux calculés pour le kaolin théorique. SiO_2/R_2O_3 est un peu moins élevé, à cause de la teneur en fer fixé sur l'argile : 5,05 p. 100, traduction tangible de la présence de Gœthite, décelée à l'analyse thermique différentielle. Bien qu'il faille se montrer très prudent en la circonstance, nous ne pensons pas avoir

affaire ici à de l'hydrargillite, car la proportion d'Al_2O_3 est inférieure à celle du kaolin théorique.

Les rapports $\frac{Fe_2O_3}{R_2O_3}$ et $\frac{Bases}{R_2O_3}$ sont très faibles, et la répartition de ces bases montre qu'il s'agit essentiellement de MgO et K_2O, alors que CaO et Na_2O ne subsistent qu'à l'état de traces.

4. — Microscope électronique.

L'observation au microscope électronique confirme la nature kaolinique de cette argile ; les cristaux apparaissent avec leur forme hexagonale typique ou parfois pentagonale, mais toujours les arêtes délimitent des angles de 120°.

Le sous-sol et le sol. Zones A_1 et A_0. Échantillons 594 et 595

I. — Graviers et sables.

Les observations relevées lors de l'étude des échantillons de l'arène sont valables également pour le sous-sol et le sol, avec toutefois cette différence que le pourcentage des éléments fins s'accroît.

Les fractions $<$ 2 mm contiennent surtout des cristaux de quartz et de microcline, ces derniers avec des faces tranchantes, et de grandes dimensions (jusqu'à 1 cm). Absence de biotite et très peu de plagioclases. Ceux-ci apparaissent dans la fraction 1,25 mm-2 mm, toujours sous forme de poudre blanchâtre, pouvant se loger dans les géodes des microclines.

La fraction 500-800 est constituée de fragments de plagioclases totalement altérés et de biotite plus pulvérisée que dans l'arène sous-jacente. On note la présence de rares cristaux de muscovite dans la zone A_1. Les éléments compris entre 200-315 contiennent quelques quartz d'une remarquable transparence, et des paillettes de muscovite, très blanche, sans la moindre altération alors que la biotite est très mordorée.

II. — Limon.

Mêmes remarques que pour l'arène C_0. Grâce au microscope polarisant, on identifie la présence de minuscules cristaux de quartz brillant, de feldspaths et de biotite très abondante.

III. — Argile.

1. — **Analyse thermique différentielle de l'échantillon 595.** (Courbe S. 322).

Le tracé de cette courbe est sensiblement identique à celui de l'échantillon 593. Nous retrouvons un crochet endothermique entre 120°-250°,

une seconde inflexion à 300°, caractéristique de l'oxyde de fer, le crochet à 480°-700° ; l'inflexion exothermique est ici plus accusée que précédemment ; elle débute dès 850° pour prendre fin à 950°, suivie d'une autre inflexion également exothermique, très peu marquée entre 950° à 1 000°.

Nous sommes donc conduits au même diagnostic.

2. — **Analyse roentgenographique.**

Les radiogrammes sont exécutés suivant la technique de DEBYE-SCHERER ; nous avons utilisé le rayonnement de la raie Kz du Fer dont la longueur d'onde = 1^{A},9359 et, une chambre circulaire de 76,4 mm de diamètre. L'appareil fonctionne sous 25 Kv et 12 m Ampères, et les préparations sont exposées au flux des rayons X durant 4 h. Les équidistances réticulaires sont établies à l'aide des tables de GUINIER ou d'ASSUNCAO-GARAUDO. Pour l'interprétation des résultats, nous avons consulté les travaux de G. MILLOT (1949), de A. RIVIÈRE et P. MUNIER (1946 et 1951).

Les spectres des deux échantillons d'argile extraits des zones A_1 et A_0 présentent des raies estompées à cause de la petite quantité de matériel disponible mis en jeu, mais cependant bien mesurables. Voici les caractéristiques de ces spectres, très voisins l'un de l'autre.

— Une raie moyenne correspondant à un écart réticulaire de 7,20 Å.

— Une raie de même intensité que la précédente pour un écart de 4,47 Å pour la zone A_1 et 4,39 Å pour A_0.

— Une raie moyenne, non dédoublée (écart 4,26 Å).

— Une raie encore d'intensité moyenne (écart 3,56 Å) suivie d'une raie forte, tranchant très nettement sur toutes les autres (écart 3,34 Å).

— Une raie très floue (écart 3,19 Å) seulement pour la zone A_1.

— Une raie floue (écart 2,97 Å).

— Une raie moyenne d'intensité identique aux premières (écart 2,56 Å).

Suivent des raies faibles et floues (écarts 2,11 Å, 1,98 $Å_1$, 1,77 Å).

Ces 2 colloïdes sont donc essentiellement constitués par de la kaolinite à laquelle s'ajoute du quartz : les raies intenses à 3,35 Å et 4,26 Å sont en effet les équidistances fondamentales de ce minéral, pouvant par conséquent se pulvériser en particules très fines ; notons que sa présence ne constitue pas une gêne dans le dépouillement des radiogrammes ; ses raies très caractéristiques forment même des repères intéressants.

Nous avons tenu à soumettre à l'analyse deux fractions colloïdales de façon à vérifier s'il s'agissait bien du même matériel argileux tout le long du profil, hypothèse à priori la plus vraisemblable, ou si, au contraire, des différences pouvaient se manifester, conduisant à invoquer des transformations sous l'influence d'agents physico-chimiques. Rappelons en

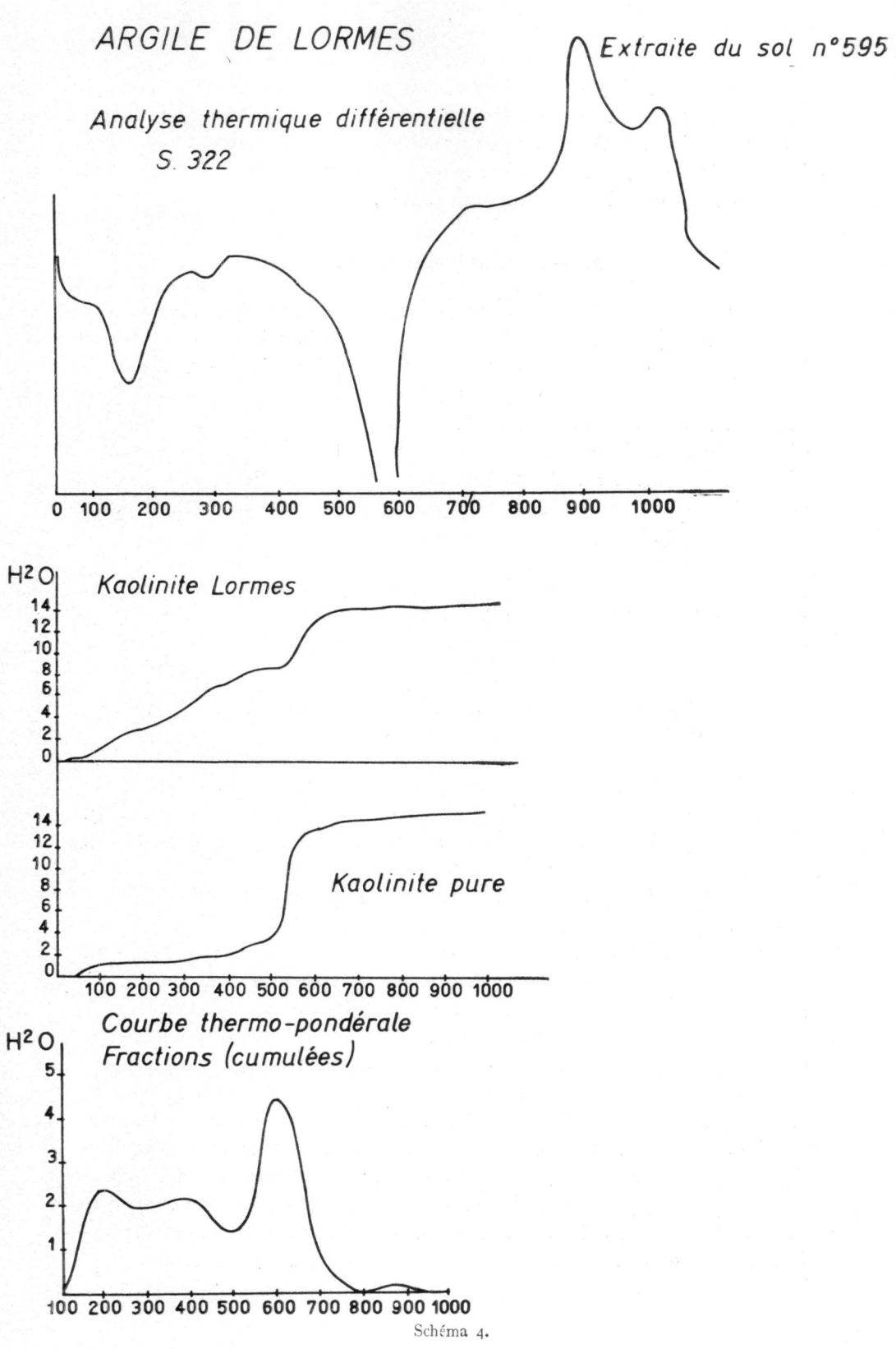

ARGILE DE LORMES
Extraite du sol n°595
Analyse thermique différentielle
S. 322
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000
H2O
Kaolinite Lormes
14 12 10 8 6 4 2 0
Kaolinite pure
100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000
Courbe thermo-pondérale
Fractions (cumulées)
5 4 3 2 1
100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000

Schéma 4.

effet les travaux de Mlle Caillère et S. Hénin (1949) qui ont pu, au laboratoire, obtenir des transformations entre Mica-Vermiculite et Montmorillonite-Chlorite. Ne pourraient-elles pas avoir lieu dans la nature?

3. — **Analyse thermo-pondérale** (colloïde 595).

La courbe obtenue pour cette argile de l'horizon Ao à l'aide de la thermo-balance diffère de celle de la kaolinite pure, car la perte en eau aux environs de 200°-300° est plus accusée, et, par contre, moins brutale entre 500°-600°.

Pertes en valeurs absolues :
de 100° à 400° = 6,6
de 400° à 600° = 6,0
de 600° à 900° = 0,9
Total : 13,50

Pertes en valeurs relatives pour total : 100.
de 100° à 400° = 48,8 p. 100
de 400° à 600° = 44,4 p. 100
de 600° à 900° = 7,3 p. 100

Ce comportement assigne pour le colloïde étudié une identité voisine du groupe des halloysites, mais il appartient néanmoins à celui des kaolinites, aucune raie caractéristique de ce minéral n'ayant apparu dans le spectre.

Conclusion

Les diverses méthodes ainsi confrontées fournissent donc une bonne concordance, et nous sommes amenés à conclure que la phase la plus fine est formée tout au long du profil de la carrière d'un mélange de kaolinite prépondérante, et d'une fraction de Goethite et de quartz.

II. — L'ALTÉRATION CHIMIQUE DU GRANITE PORPHYROIDE DE LORMES

1. — Constitution chimique des différents horizons de la carrièrre de l'Abattoir

Il est intéressant de déterminer la constitution chimique des différents horizons de la carrière de l'Abattoir et surtout d'établir des comparaisons entre ces valeurs pour en dégager des renseignements en ce qui concerne l'altération chimique du granite qui se développe corrélativement à l'altération physique.

Méthode d'analyses chimiques totales :

Nous avons suivi la technique de C. ROUGER (1954) appliquée au Laboratoire de Géologie et de Minéralogie de Clermont-Ferrand. Toutefois pour le dosage de P_2O_5, nous avons préféré la méthode LORENZ-SCHEFFER. Rappelons simplement que P_2O_5 est précipité à l'état de phospho-molybdate d'NH_4. Ce précipité jaune est recueilli sur filtre, dissous par NaOH N/10, en présence de formol contenant de la phénolphtaléine ; on détermine l'excès de NaOH par une liqueur acide N/10.

D'autre part, les alcalins ont été dosés à l'aide du photomètre à flamme.

Constitution chimique de la totalité des fractions minérales supérieures à 2 mm et de la terre fine inférieure à 2 mm. Les résultats se trouvent consignés dans le tableau ci-joint.

Ces analyses indiquent des constitutions chimiques totales très voisines pour le granite frais, granite altéré — arène et sol —. Les variations pour SiO_2, Al_2O_3, K_2O sont très faibles, un peu plus marquées pour MgO, plus accentuées pour Fe_2O_3 et FeO, CaO, Na_2O. Nous sommes loin des variations considérables enregistrées dans l'altération des roches sous les pays tropicaux, mentionnées au début de ce travail ; sous nos climats, nous n'avons en effet pour les granites *qu'une altération chimique ménagée.*

Les rapports moléculaires, source d'indication sur l'Altération chimique.

Ils permettent de se rendre compte des pertes globales subies par chacun des éléments chimiques au cours des processus d'altération et de saisir leur plus ou moins grande faculté de migration.

Analyse chimique de la totalité des fractions minérales supérieures à 2 mm et de la terre fine inférieure à 2 mm.

N° des échantillons	H_2O	H_2O+	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	P_2O_5	TiO_2	MnO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Total
R. 59 Roche fraîche An. 408 M. THERON Clermont Juil. 1955	0,06	0,83	71,05	15,20	2,12	0,70	0,05	0,40	tr	1,27	1,17	3,80	2,75	99,40
R. 60 Roche altérée An. n° 1 SAJOT-DEJOU.....	0,19	1,05	70,01	17,23	1,02	1,30	0,16	0,25	tr	0,78	1,13	4,35	1,75	99,22
N° 591 Arène profonde An. n° 2 SAJOT-DEJOU.....	0,45	2,25	68.88	18,31	1,04	0,29	0,10	0,15	tr	0,61	0,80	5,60	1,60	100,08
N° 594 Sous-sol An. 3 SAJOT-DEJOU...	0,52	5,73	69,83	16,26	0,90	0,43	0,09	0,12	tr	0,61	1,06	4,10	1,36	101,01
N° 595 Sol An. 4 SAJOT-DEJOU.....	0,95	4,81	70,41	16,34	0,83	0,43	0,09	0,07	tr	0,67	0,74	3,97	1,37	100,63

Par bases, nous entendons ici la somme MgO + CaO + Na_2O sans K_2O, relativement constant.

Tableau des Rapports Moléculaires. Granite Porphyroïde de Lormes (Nièvre).

N°	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{SiO_2}{Fe_2O_3}$	$\frac{SiO_2}{K_2O}$	$\frac{SiO_2}{Na_2O}$	$\frac{SiO_2}{CaO}$	$\frac{SiO_2}{MgO}$	$\frac{SiO_2}{Bases}$
R. 59.....	7,94	65,77	29,3	26,72	52,20	40,47	12,29
R. 60.....	6,94	75,77	25,4	41,38	83,83	41,31	16,57
n° 591 Arène							
n° 594 sous-sol	6,41	135,05	19,46	44,50	105,41	57,40	20,23
	7,32	134,91	25,6	53,10	106,9	43,95	19,62
n° 595 sol...	7,26	144,62	27,77	53,10	101,80	63,40	22,32

Les constituants chimiques du granite de Lormes se classent comme suit par ordre de mobilité croissante :

$$SiO_2,\quad Al_2O_3 \leqslant K_2O < MgO < Na_2O \quad \text{et} \quad CaO < Fe_2O_3.$$

Dans le cas du granite de Saint-Gervais d'Auvergne, D. COLLIER avait obtenu le classement suivant, très peu différent :

$$SiO_2 \quad \text{et} \quad K_2O \leqslant Al_2O_3 < Na_2O \leqslant MgO < CaO.$$

Ces rapports moléculaires montrent la remarquable *stabilité de la potasse*, liée à la grande résistance des feldspaths potassiques à l'altération, ce qui confirme les études chimiques de D. COLLIER effectuées sur des cristaux de microcline isolés et nos propres observations minéralogiques. De plus, la vulnérabilité des feldspaths calco-sodiques, si nette sur le terrain, apparaît aussi clairement avec le départ de Na_2O et CaO. La mobilité de MgO traduit comme le prouvent plus loin les calculs suivant la technique de P. NIGGLI et C. BURRI, l'élimination de la Biotite, *moins importante que celle des feldspaths calco-sodiques.*

Quant au Fe_2O_3 total (Fe_2O_3 + FeO), il représente pour Lormes l'élément le moins stable. Sa circulation est attestée par la présence de traînées limoniteuses surtout fréquentes sur les fragments des feldspaths calco-alcalins. Le pH joue un rôle capital dans les migrations sous la dépendance de réactions complexes d'oxydo-réduction. Nous avions d'ailleurs signalé les déplacements de ce constituant dans la carrière de Brassy.

2. — Constitution chimique des diverses fractions granulométriques de l'arène de Lormes

Nous avons pensé qu'il était intéressant d'étudier la composition chimique de chacune des fractions granulométriques de l'arène, savoir sables grossiers, sables fins, limon et argile. Elle figure dans la partie gauche du tableau, alors que la partie droite exprime cette composition en p. 100 de terre fine totale.

Étude de la composition chimique totale des diverses fractions granulométriques constituant l'arène profonde de Lormes.

Éléments < 2 mm Échantillon nº 593.

Fractions analysées et nº des échantillons	P. 100 de chaque fraction				P. 100 de terre fine totale (An. phys., nº 593)				
	Sables grossiers 2 000-200 µ nº 5 931	Sables fins 200-20 µ nº 5 932	Limon 20-2 µ nº 5 933	Colloïdes ⩽ 2 µ nº 5 934	Sables grossiers nº 5 931	Sables fins nº 5 932	Limon nº 5 933	Colloïdes nº 5 934	Totaux
Nº des analyses	An. 662 Y. CHALEIL Clermont Janv. 1957	An. 669 Y. CHALEIL Clermont Fév. 1957	An. 636 Y. CHALEIL-J. DEJOU Clermont Déc. 1956	An. 514 Y. CHALEIL-J. DEJOU Clermont Mai 1956					
Constituants chimiques :									
H_2O	0,25	1,00	1,60	2,50	0,13	0,18	0,18	0,42	0,91
H_2O^+	2,70	6,90	8,93	13,20	1,44	1,30	1,02	2,23	5,99
SiO_2	69,75	51,45	47,55	42,55	37,22	9,69	5,44	7,21	59,56
Al_2O_3	16,70	27,95	34,65	35,85	8,91	5,26	3,96	6,07	24,20
Fe_2O_3	1,25	2,65	2,37	5,05	0,76	0,50	0,27	0,85	2,38
FeO	1,20	1,25	0,25	tr.	0,64	0,23	0,028	—	0,898
P_2O_5	0,15	0,15	0,10	0,00	0,08	0,02	0,01	—	0,11
TiO_2	0,50	0,80	0,26	0,25	0,26	0,15	0,029	0,04	0,479
MnO	tr.	tr.	tr.	tr.	—	—	—	—	—
CaO	0,20	0,40	tr.	tr.	0,10	0,07	—	—	0,176
MgO	0,80	1,25	0,80	0,80	0,42	0,23	0,09	0,13	0,87
K_2O	6,20	4,20	3,20	0,70	3,31	0,79	0,36	0,11	4,168
Na_2O	1,00	1,60	0,55	0,05	0,53	0,30	0,06	0,008	0,998
Total	100,70	99,60	100,25	100,95	53,80	18,72	11,447	17,068	100,74
Rapports moléculaires :									
SiO_2/R_2O_3	6,50	2,86	2,22	1,85					3,94
Bases/R_2O_3	0,58	0,36	0,18	0,07					0,34

Au fur et à mesure que le diamètre des particules diminue, la teneur en SiO_2 baisse, alors que Al_2O_3 augmente. D'autre part, les minéraux perdent leurs bases, surtout CaO et Na_2O, totalement éliminés. Tout comme dans les sols, les rapports moléculaires SiO_2/R_2O_3 ($R_2O_3 = Al_2O_3 + Fe_2O_3$) et $Bases/R_2O_3$ décroissent des sables aux colloïdes.

La seconde partie du tableau permet de se rendre compte de la répartition des éléments chimiques dans chacune des fractions de l'arène. Ce sont ici les sables grossiers qui prédominent avec 53,8 p. 100 de la terre fine totale, 37,22 p. 100 du SiO_2 et la majeure partie de K_2O, eu égard à leur richesse en microcline.

3. — Détermination de l'intensité de l'altération chimique globale du granite de Lormes et de chacun de ses minéraux.

A

L'étude des rapports moléculaires ne renseigne pas sur l'intensité globale des phénomènes d'altération depuis la roche-mère jusqu'au sol, et ne fournit pas davantage de précisions chiffrées quant à la disparition de chacun des minéraux. Il est pourtant d'un grand intérêt d'essayer de dresser un bilan minéralogique, faisant apparaître les pertes ou les gains des constituants.

Technique de la fusion au SO_4HK appliquée à l'altération des granites d'Auvergne par D. Collier (1953).

D. Collier a appliqué à l'étude de l'altération du granite de Saint-Gervais d'Auvergne une technique décrite par G. Millot.

Cinq grammes de bisulfate de potasse sont fondus dans une capsule de platine avec 1 g de roche soigneusement pulvérisée. Après refroidissement, les produits de fusion sont repris par 10 cm³ de ClH pur, D = 1,19 ; on laisse bouillir 10 minutes sur bain de sable, en évitant les projections, et le résidu est centrifugé et lavé à l'eau chaude. Il est ensuite transvasé dans des béchers de 100 cm³ à l'aide d'un jet d'eau distillée et traité par 10 cm³ NaOH (D = 1,33). Ce second résidu est à son tour centrifugé et lavé par l'eau distillée chaude, jusqu'à neutralité observée avec le bleu de bromothymol. Il est enfin calciné, pesé et son analyse s'effectue par attaque sulfo-fluorhydrique.

Selon l'auteur, le « résidu insoluble au SO_4HK est un test d'appréciation de la partie non altérée » de l'arène et du sol, et le processus de recherche est alors le suivant :

1° Détermination de la composition chimique élémentaire de ce résidu.

2° Calcul de la composition minéralogique correspondante.

3° Comparaison des constitutions minéralogiques obtenues pour chaque horizon avec celle du granite générateur, en prenant comme référence le quartz le plus stable.

L'application de cette méthode a conduit D. COLLIER à l'énoncé de propositions intéressantes dans le cas du granite de Saint-Gervais. Le départ le plus faible est celui du microcline (16,8 p. 100), alors que l'albite et l'anorthite accusent respectivement 54 p. 100 et 66,7 p. 100 de pertes. Le calcul confirme bien les remarques formulées sur le terrain.

Discussion de la méthode

Il est certain que cette technique peut être à l'aube d'une orientation nouvelle dans les recherches sur l'altération des roches. Et il semble qu'à l'heure actuelle le problème pourrait ainsi se poser : peut-on, par voie chimique apprécier la fraction des constituants minéralogiques d'une zone d'altération et d'un sol surmontant une roche-mère qui est éliminée dans les conditions naturelles, par le jeu normal et séculaire des processus de désagrégation? Problème très délicat, identique à celui qu'ont eu à résoudre les agronomes dans la discrimination du taux d'acide phosphorique et de potasse dits « assimilables » par les plantes, et qui a nécessité des années de recherches et les efforts conjugués d'un grand nombre d'auteurs, avant d'aboutir à l'emploi de réactifs très peu énergiques.

Le choix d'un dissolvant est particulièrement difficile, pour respecter l'action des agents de la nature, parce qu'elle s'avère essentiellement variable suivant la résistance du matériau originel, suivant la latitude et les données climatiques, et parce qu'elle s'exerce souvent d'une façon discontinue. D. COLLIER a proposé le traitement au SO_4HK des différents horizons d'un même profil reposant sur granite, en ayant soin au préalable de calculer les fractions solubilisées de minéraux purs soumis à l'attaque de ce produit. Or la muscovite et la biotite sont éliminées dans les proportions respectives de 89,5 p. 100 et 99,2 p. 100, ce qui, à notre avis, n'est pas conforme aux faits d'observation, surtout pour la biotite se concentrant dans les fractions fines des arènes et des sols du Morvan Nord, et demeurant encore dans un état de relative fraîcheur dans les éléments grossiers de ces formations. Nous savons, d'autre part, que le rapport $SiO_2/MgO < SiO_2/Na_2O$ et SiO_2/CaO ; le SO_4HK constitue en particulier pour ces minéraux un agent dissolvant trop énergique, ce qui nous a conduit, pour fixer un bilan à l'issue de l'altération, à établir une composition minéralogique à partir des données chimiques des échantillons, sans les soumettre à un traitement préalable.

B

Application de la méthode américaine C. P. I. W. à la détermination du bilan minéralogique d'altération du granite porphyroïde de Lormes.

La méthode américaine C. P. I. W. offre la possibilité de déterminer, dans le cas des roches éruptives, une composition minéralogique virtuelle. Dès lors, nous pouvons établir un bilan de l'altération pour le granite de Lormes en adoptant le schéma suivant :

1° Détermination de la composition chimique des prélèvements effectués dans les différents horizons C C_1 C_0 A_1 A_0.

2° Calcul de la composition minéralogique virtuelle de chacun des horizons à partir des données chimiques.

3° Détermination de la constitution minéralogique des différents horizons, composée à 100 du granite frais de référence, en supposant le quartz le minéral le plus résistant.

Objections à cette technique d'étude.

Un certain nombre d'objections doivent être formulées à l'encontre de cette manière de procéder.

Tout d'abord, elle suppose que les divers horizons C C_0, A_1 A_0 sont disposés suivant un même profil, et que l'homogénéité du gisement est satisfaisante. Or, ces conditions assez exceptionnelles il est vrai ne sont pas remplies dans la carrière de l'Abattoir : le granite frais a été récolté en effet en dehors du profil et, d'autre part, les analyses révèlent une assez grande hétérogénéité physique.

Par ailleurs, la composition minéralogique obtenue n'est que virtuelle, et partant incomplète ; la biotite en particulier n'apparaît pas dans les résultats, MgO qui la constitue servant à former de l'hypersthène absent dans le granite originel.

Enfin — et c'est peut-être l'objection la plus sérieuse — les calculs ne font pas apparaître les produits nouveaux, de type argile, qui prennent naissance en cours d'altération ; de sorte que si cette composition virtuelle reflète assez bien le pourcentage de chacun des minéraux présents dans les horizons C et C_1, elle est entachée de nouvelles erreurs pour les horizons supérieurs C_0, A_1, A_0.

Toutefois, eu égard à la faible amplitude des processus chimiques sous nos climats tempérés, nous avons fait usage de cette méthode dont nous allons tirer d'utiles renseignements.

1° Composition chimique des prélèvements de la carrière de l'Abattoir, dans les horizons C, C_0, A_1, A_0.

Se rapporter au tableau p. 64.

2° Tableau des constitutions minéralogiques des horizons calculées suivant la méthode C. P. I. W.

Minéraux	R. 59 Granite frais C	R. 60 Granite altéré C_1	591 Arène profonde C_0	594 A_1 Sous-sol	Sol A_0 595
Quartz	36,42	39,84	36,06	43,92	45,18
Orthose	22,24	25,57	32,80	23,91	23,35
Albite	23,05	14,67	13,62	11,53	11,53
Anorthite	6,11	3,06	2,22	2,22	2,45
Corindon	4,38	8,57	8,78	8,77	8,87
Barylites	6,10	6,18	3,74	4,41	3,45
H_2O	0,89	1,24	2,70	6,25	5,76
Total	99,19	99,13	99,92	101,01	100,59

3° Tableau des constitutions minéralogiques de l'ensemble des fractions cristallines des différents horizons de Lormes comparées a 100 du granite frais de référence, en supposant le quartz le minéral le plus résistant.

Minéraux	R. 59 C	R. 60 C_1	591 C_0	594 A_1	595 A_0	Pertes de C à A_0	
						% de C	% de chaque minéral
Quartz	36,42	36,42	36,42	36,42	36,42	0,0	0,0
Orthose	22,24	23,37	33,12	19,82	18,82	3,42	15,37
Albite	23,05	13,41	13,78	9,56	9,29	13,76	59,70
Anorthite	6,11	2,80	2,24	1,84	1,97	4,14	67,75
Corindon	4,38	7,83	8,86	7,27	7,00	— 2,71	(+ 61,87)
Barylites	6,10	5,65	3,77	3,65	2,78	3,32	54,44
H_2O	0,89	1,13	2,67	5,18	4,64	— 3,75	(+ 421,3)
Total	99,19	89,71	100,86	83,74	81,01	18,18	

Résultats. — Ils indiquent 24,64 p. 100 de pertes depuis C à A_0, mais celles-ci sont compensées en partie par l'accroissement de la teneur en H_2O (3,75 p. 100) et par l'augmentation de Al_2O_3 (2,71 p. 100), de telle sorte que le bilan définitif se solde par un départ de 18,18 p. 100 de la roche-mère.

La dernière colonne exprimant les pertes de chaque minéral est très significative ; 15,37 p. 100 seulement du feldspath potassique a été éliminé ; cette proportion est multipliée par 4 pour les plagioclases. D. Collier avait publié des chiffres presque identiques pour le granite de Saint-Gervais (1951).

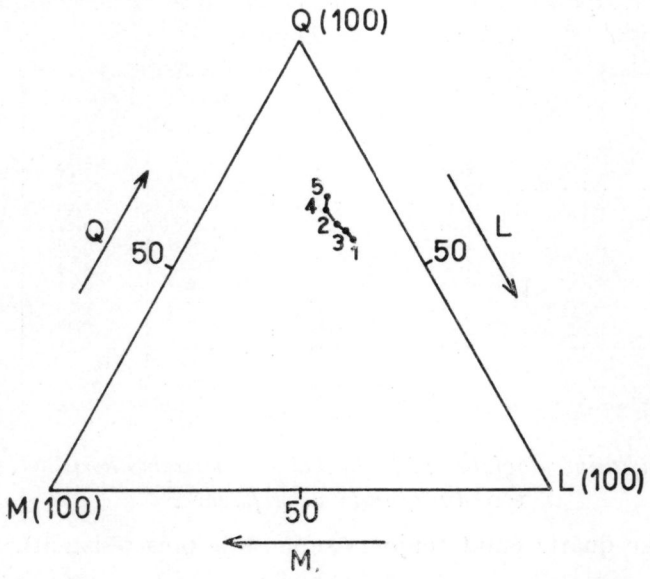
L'accroissement du corindon virtuel traduit les processus d'argilisation ; quant au grain en H_2O, relativement élevé, il montre toute l'importance des *phénomènes d'hydratation* dans l'altération chimique, fait qui a recueilli les suffrages de tous les auteurs.

Représentation graphique de la marche de l'altération par le diagramme de Niggli.

Nous pouvons suivre graphiquement la progression de l'altération chimique en calculant les coordonnées triangulaires Q. L. M. de NIGGLI, qui donnent une représentation des principales caractéristiques chimiques et minéralogiques de chaque horizon

Diagramme de Niggli

Représentation graphique de la marche de l'altération du Granite de Lormes



Graphique 1.

Coordonnées	Granite frais (1)	Granite altéré (2)	Arène (3)	Sous-sol (4)	Sol (5)
Q.....	57,8	60,3	58	63,1	64,2
L	32,7	28,5	31,5	25,3	25,3
M	9,5	11,4	10,5	11,6	10,5

Ces coordonnées, très voisines les unes des autres, illustrent la faible part de l'altération chimique du granite, aux caractères très atténués. On s'oriente surtout vers un gain de quartz, car le point représentatif depuis la roche jusqu'au sol s'élève vers le nord du champ des combinaisons quartziques.

C

Application de la méthode de P. Niggli et C. Burri à la fixation du bilan minéralogique de l'altération du granite de Lormes.

Le calcul de la constitution minéralogique moléculaire selon la méthode de P. Niggli (1936), revue ensuite par C. Burri (1945), a l'avantage de pallier à un certain nombre d'inconvénients de la méthode américaine. En effet, il permet de connaître le pourcentage des minéraux identifiés au préalable au microscope polarisant, par conséquent de serrer de plus près la réalité. Il s'étend aussi au domaine cristallophyllien (M. Roques l'a largement utilisé dans sa thèse), alors que la première méthode ne s'applique qu'aux roches éruptives. Nous allons dès lors pouvoir

Tableau des compositions minéralogiques moléculaires calculées des différents échantillons de Lormes.

Minéraux	Granite frais R. 59	Granite altéré R. 60	Arène profonde 591	Sous-sol 594	Sol 595
Quartz	36,23	40,04	35,02	42,72	43,65
Microcline	19,86	22,16	31,42	21,72	21,91
Albite	25,03	15,98	14,66	12,40	12,45
Anorthite	6,26	3,13	2,26	2,24	2,53
Corindon	4,89	9,59	9,73	9,69	9,68
Biotite	4,62	6,56	2,99	4,14	3,00
Ilménite	0,80	0,53	0,32	0,16	0,16
Magnétite	1,40	0,49	0,68	0,83	0,68
Apatite	—	0,28	0,28	0,28	0,28
H_2O totale	0,89	1,24	2,70	6,25	5,76
Total	99,98	100,00	100,06	100,43	100,27

Constitutions minéralogiques moléculaires des différents horizons comparées à 100 *du granite de référence.*

(Le quartz étant toujours supposé le plus résistant).

Minéraux	Granite frais C	Granite altéré C_1	Arène 591	Sous-sol 594	Sol 595	Pertes de C à A_0	
						% de C	% de chaque minéral
Quartz	36,23	36,23	36,23	36,23	36,23	0	0
Microcline	19,86	20,05	32,48	18,42	18,18	1,68	8,45
Albite	25,03	14,46	15,15	10,51	10,33	14,70	58,73
Anorthite	6,26	2,83	2,33	1,90	2,10	4,16	66,45
Corindon	4,89	8,67	10,06	8,22	8,17	(— 3,28)	(+ 67,07)
Biotite	4,62	5,93	3,09	3,51	2,49	2,13	46,11
Ilménite	0,80	0,48	0,33	0,13	0,13	0,67	83,75
Magnétite	1,40	0,44	0,70	0,70	0,56	0,84	60,00
Apatite	—	—	—	—	—		
H_2O	0,89	1,12	2,79	5,30	4,78	(— 3,89)	(+ 437,08)
Total	99,98	90,21	103,16	84,92	82,97	17,01	

effectuer des comparaisons valables entre l'altération chimique du granite et des anatexites du Morvan-Nord. Par contre, elle n'échappe pas aux autres critiques déjà formulées à l'adresse de la méthode américaine.

Rappelons simplement qu'à la suite de la détermination de la « base », la composition minéralogique moléculaire est acquise à l'aide de formules propres à chaque minéral et dans lesquelles la somme des coefficients est identique dans les deux membres.

Résultats.

Les compositions minéralogiques obtenues suivant les deux méthodes de calcul sont très voisines. Quant aux pertes totales, elles se chiffrent à 17,01 p. 100 au lieu de 18,18 p. 100 ; celles des plagioclases sont identiques ; pour le microcline, le calcul indique 8,45 p. 100 au lieu de 15,37 p. 100. Exception faite pour ce résultat, les deux méthodes sont parfaitement concordantes.

La méthode de NIGGLI-BURRI renforce l'idée de la grande résistance du Microcline à l'altération chimique, puisque 8,45 p. 100 seulement du minéral ont disparu, et met aussi en évidence la fragilité des feldspaths calco-alcalins. Quant à la Biotite qui ne figurait pas dans la méthode C. P. I. W. (46,11 p. 100 éliminés), elle apparaît plus résistante que les plagioclases totalement dégradés sur le terrain et réduits en une poussière blanchâtre, ou argilisés. L'augmentation du pourcentage de corindon traduit cette argilisation.

Les différences enregistrées pour le Microcline (8,45 p. 100 au lieu de 15,37 p. 100) s'expliquent aisément par le fait que dans la méthode américaine la potasse est bloquée en totalité sur ce minéral, alors que dans celle de NIGGLI-BURRI, elle se répartit entre le Microcline et la Biotite.

La mobilité du fer apparaît avec une grande netteté ; il est éliminé sous forme de traînées plus ou moins jaunâtres, colorant notamment les plagioclases.

Rapport $\frac{SiO_2}{K_2O}$. — Ce rapport reste relativement constant dans les horizons de la carrière de Lormes. D. COLLIER (1951) avait d'ailleurs signalé ce résultat dans son étude des granites du Massif Central, notamment celui de Saint-Gervais d'Auvergne.

Voici dans quelles proportions se répartit la potasse dans le cas envisagé.

Horizons	% K_2O du Microcline	% K_2O de la Biotite
Granite frais	87,30	12,70
Granite altéré	84,39	15,61
Arène	94,40	5,60
Sous-Sol A_1	89,58	10,42
Sol A_0	92,12	7,88

La majeure partie de la potasse entrant dans la constitution du Microcline très résistant suffit à rendre compte de la constance relative du rapport SiO_2/K_2O, dont les variations sont imputables à la teneur plus ou moins élevée en Biotite, minéral fragile. Sous nos climats tempérés, cette donnée chimique pourra caractériser la zone d'altération surmontant les massifs granitiques, originellement pauvres en Biotite, et la constance du rapport depuis le granite frais jusqu'au sol sera d'autant plus absolue que la teneur en ce minéral sera plus faible.

Nous sommes dès lors conduit à énoncer les propositions suivantes :

a) *La kaolinisation de l'orthose ou du microcline des granites*, décrite dans plusieurs traités, apparaît nettement exagérée puisque ce minéral demeure presque intact, la quantité d'argile fournie sera donc faible. Nous ne faisons que confirmer sur ce point les observations de D. Collier (1951).

b) *La teneur en K_2O assimilable des sols granitiques du Morvan-Nord*, élément fondamental de l'équilibre NpK, ne résultera pas de l'altération des feldspaths potassiques, mais dépendra de la richesse en Biotite de la roche-mère, minéral libérant sa potasse. On comprend dès lors pourquoi — et nous étudierons ceci en détail dans le chapitre des sols — la région de Lormes, bien que caractérisée par un stock très important en K_2O totale, ne soit pas cependant favorisée sous le regard de la teneur en cet élément utilisable pour les cultures.

CHAPITRE V

L'ALTÉRATION DES ANATEXITES A CORDIÉRITE DU MORVAN-NORD

ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE DE CES ROCHES

Les anatexites à cordiérite du Morvan-Nord dessinent sur la feuille d'Avallon, au 1/80.000, une frange orientée ouest-est, pincée entre le granite porphyroïde de Lormes et la granulite d'Avallon. A l'ouest, leur massif atteint environ 8 km de large entre Saint-Martin-du-Puy et le Bois de Sérée, mais à mesure que l'on se dirige sur l'est, dans la direction de Rouvray, la largeur de celui-ci s'amenuise, et à la hauteur de Thoste nous n'avons qu'une mince bande de terrain de 800 m qui disparaît enfin sous les assises liasiques près de Montigny.

Leurs affleurements sont beaucoup moins nombreux que dans le cas du granite ; les meilleurs se rencontrent à Moulin-de-Main, près de la commune d'Empury, sur les bords de la Briniane, à Chastellux, au-delà du pont sur la Cure, et à proximité de Saint-Brancher. Le contact granite-anatexite s'observe à Berges, à 3 km de Saint-Martin-du-Puy.

Ces roches ont été décrites par A. Michel LÉVY sous le nom de gneiss, et c'est ainsi que les nomment certains agriculteurs de la région, puis par A. COCHET qui a procédé à leur exacte identification (1953).

Contrairement au granite, leur faciès n'est pas identique dans tout le massif. A Moulin-de-Main, nous avons en général des roches à grain fin, à texture nébulitique (Échantillon 56, 56 *a*), mais à Chastellux et à Saint-Brancher, le long de la vallée de la Cure, on rencontre une roche à grain un peu plus gros (Échantillon 75-79), d'allure plus ou moins embréchitique, où la schistosité cristallophyllienne est conservée. La texture varie de façon sensible d'un point à un autre, et cette sporadicité du faciès embréchitique les a fait ranger par A. COCHET dans les anatexites.

CONSTITUTION MINÉRALOGIQUE

1. — Anatexite de Moulin-de-Main, près Empury (Nièvre).

Prélèvements le long de la Briniane : Coordonnées. E. M. Avallon S. O. : 711 × 262,3.

Échantillon n° 56 L. M. n° 5 891.

n° 56 *a* L. M. n° 5 858 ;

n° 55 L. M. n° 6 171.

Ces anatexites nébulitiques ont une très légère tendance à passer aux embréchites. La schistosité cristallophyllienne est nette. Très compactes, leur altération est presque nulle.

L. M. 5 891. — Les minéraux observés sont les suivants :

Quartz.
Oligoclase.
Microcline sodique.
Biotite.
Muscovite.
Cordiérite.
Minéraux opaques, surtout Magnétite.
Apatite.

La structure est granoblastique, avec une tendance lépidoblastique.

Le *Quartz*, très abondant, se présente sous forme de sections de dimension moyenne et, d'autre part, en cristaux très petits, en gouttelettes, traduction d'une métasomatose secondaire, de nature siliceuse. Les plages sont très transparentes, et n'ont pas d'extinction roulante.

Plagioclase. Il s'agit d'une oligoclase moins abondante que le quartz.

Les cristaux sont très transparents à la lumière et fortement agglutinés aux autres minéraux. Leur clivage est fin. Quelques plages de Biotite sont englobées dans le feldspath.

Plusieurs cristaux portent la marque de cassures dues à des effets mécaniques, et bien que la roche soit très fraîche et difficile à détacher, on identifie la présence de Séricite dans un certain nombre de sections, ce qui indique un début d'altération, tout comme dans le granite de Lormes. Toutefois, la Séricite ne couvre qu'une surface réduite.

Microcline sodique (2 V = — 76°). Il s'agit d'un microcline perthitique. Les porphyroblastes, aussi abondants que les plagioclases, ont repoussé les autres cristaux : Quartz, Oligoclase et Biotite ; parfois au contact du mica, les extrémités de ce minéral ont été brisées, arrachées, et ces particules se perdent dans la mésostase.

Le Microcline est intact, hors quelques cassures mécaniques. Notons dans une section la présence de 3 inclusions de nature indéterminée.

Biotite. Très abondante, elle se rencontre en lames de plusieurs millimètres de long, partiellement et faiblement chloritisée sur certaines sections. Les plages sont très polychroïques et dépourvues d'exsudats de minerais. A signaler quelques cristaux légèrement décolorés ; bref, très peu de signes d'altération.

Muscovite. Elle est beaucoup moins fréquente que la Biotite et ses plages sont intactes.

Cordiérite. Ce minéral est exceptionnellement abondant dans tout le gisement du Morvan-Nord. Dans la lame examinée, il se présente dans

un état d'altération avancée, à telle enseigne qu'il n'en demeure qu'une infime partie à l'état frais.

On observe des cristaux automorphes, de forme ronde ou ovale, disséminés dans toute la trame. Au centre, la cordiérite est intacte, avec ses propriétés optiques voisines de celles du quartz. Sur le pourtour, on assiste à sa transformation en une matière amorphe, isotrope, qui s'éteint totalement entre nicols croisés. Il s'agit de la *Pinite*. L'altération de la cordiérite en Pinite a toujours son point de départ au centre du cristal, et jamais à la périphérie, ce qui permet d'imaginer — en accord avec les réflexions de M. ROQUES (1941) sur les anatexites à cordiérite de Lamontelarie — dans le Tarn — que dans cette transformation les changements de conditions physiques doivent jouer un rôle plus important que les phénomènes chimiques. Ici, pas de Gigantolite.

La Pinite est affectée de cassures, certaines très larges, dans lesquelles s'insinue un complexe de minéraux : Biotite, Chlorite et Muscovite.

Minéraux opaques. Ils sont assez rares dans la préparation, et surtout représentés par des granules submicroscopiques de Magnétite.

Apatite. Quelques plages simplement.

L. M. N° 5 858 correspondant à la roche 56 *a*.

La composition minéralogique de cette roche prélevée à quelques dizaines de mètres de la précédente est identique à celle qui vient d'être décrite, avec cette différence toutefois que l'altération est ici amorcée.

Le Quartz, toujours très abondant, n'est pas modifié ; il présente néanmoins quelques rares sections à extinction roulante.

Les cristaux de *Plagioclases* sont parcourus le long des clivages par de minuscules paillettes de *Séricite*, bien visibles au gros grossissement du microscope.

Pas de modification en ce qui concerne le *Microcline sodique* et la *Muscovite*.

La *Biotite* est en lames constamment effilochées à leurs extrémités, déchiquetées, mais assez rarement chloritisées. Certaines plages sont recourbées, témoignage tangible des effets de torsion supportés par la roche. On note la présence de belles auréoles pléochroïques. La Biotite se trouve parfois en enclave dans les Plagioclases.

Les modifications les plus importantes affectent la *Cordiérite* ; elle se présente toujours en plages circulaires ou sub-circulaires ; la Cordiérite intacte occupe le centre de la plage, puis on passe à la Pinite amorphe et la périphérie est occupée par un nouveau minéral : la Gigantolite, parallèlement à la dégradation de la roche.

L'altération en Gigantolite s'effectue dans tous les sens, ce qui la distingue de celle des Plagioclases où elle suit les clivages. La Séricite

comble les diaclases à l'intérieur de la Pinite et elle se range souvent perpendiculairement à ces fines cassures.

L. M. nº 6 771 (Roche 55).

Cet échantillon se caractérise par la finesse du grain et l'absence d'altération.

La trame est constituée des mêmes minéraux avec du quartz globulaire, des plagioclases non séricitisés, une Biotite abondante très peu chloritisée comportant des inclusions d'apatite, et dont les lames sont quelque peu déchiquetées. Comme dans tout le gisement anatexitique de la région, la Muscovite est en faible quantité. La Cordiérite est ici intacte, non transformée en Pinite ou Gigantolite.

2. — Anatexite à cordiérite de Chastellux (Yonne).

Prélèvement au-delà du Pont de la Cure. Coordonnées carte E. M. Avallon S. O. (716,7 × 257,8).

L. M. nº 6 980 correspondant à l'échantillon R. 80.

Cet échantillon examiné sur sa tranche laisse apercevoir une schistosité cristallophyllienne assez marquée, à allure embréchitique. Cependant, celle-ci ne semble pas se retrouver au microscope.

La structure est granoblastique ; ce qui la différencie des anatexites de Moulin-de-Main, c'est que les minéraux sont presque isométriques et équigranulaires, mis à part les phénoblastes de Biotite, de plus grande dimension.

Quartz. Les plages de ce minéral très abondant offrent des contours dentelliformes, s'engrénant fortement les unes aux autres ; cet aspect n'avait pas apparu dans les prélèvements étudiés jusqu'ici. Très peu de cassures et quelques extinctions roulantes.

Plagioclases. Il s'agit d'une *Andésine* (An 36) qui englobe les micas. De grandes cassures traversent certaines sections de part en part, et la séricitisation le long des clivages est bien avancée. Les plages sont de taille analogue à celles des Quartz et Microcline. Au contact des micas, la cristallisation des plagioclases a déterminé des phénomènes d'écrasement qui se traduisent par une pulvérisation du système Biotite-Chlorite-Muscovite, réduit à une purée où s'enchevêtrent ces 3 minéraux.

Microcline Sodique (2 V = — 76º). Moyennement abondant ; les plagioclases l'emportent sur les feldspaths potassiques.

Biotite. Elle développe les plus grandes plages, et quelques-unes d'entre elles couvrent la moitié du champ visuel donné par l'objectif 10. Les sections sont brunes, très polychroïques, faiblement chloritisées, avec parfois exsudat de produits opaques dans les clivages p, représentés

par de l'Ilménite ou de la Magnétite. Notons aussi dans la Biotite la présence de fines aiguilles de Rutile.

Muscovite. Les sections intactes sont en plus grand nombre qu'à Moulin-de-Main et à Saint-Brancher. Signalons que certaines lames de micas ont tendance à s'orienter vers un centre simulant une structure sphérolitique.

Cordiérite. Moins importante dans cette préparation. Elle se rencontre à l'état de Pinite opaque, avec une Gigantolite peu distincte. Elle constitue des îlots assez disséminés, de forme ronde, fragmentés souvent par des sections de Biotite et de feldspaths, le tout ponctué de granules de Magnétite.

3. — Anatexite à cordiérite de Saint-Brancher (Yonne).

Prélèvement au sud-est de cette commune, dans la vallée du Cousin. Carte E. M. Avallon Sud-Ouest (726,1 × 270,1).

L. M. n° 6 977, correspondant à l'échantillon R. 75.

Les plis symmigmatiques sont à peine marqués, et la roche s'apparente dans cette région aux embréchites. La structure est grano-lépidoblastique, et les cristaux de plus grande taille qu'à Empury et Chastellux.

La composition minéralogique est la suivante :

Quartz.
Oligoclase-Andésine.
Microcline sodique.
Biotite-Chlorite.
Muscovite.
Cordiérite.
Accessoires (Ilménite-Magnétite-Rutile-Zircon-Apatite).

Le *Quartz,* très abondant, d'extinction normale (les extinctions onduleuses sont assez rares) est traversé parfois de fines diaclases où circulent des produits limoniteux jaunâtres. Ce minéral peut englober la Biotite.

Les *feldspaths,* dont la détermination révèle une Oligoclase, passant à l'Andésine, se caractérisent par une grande variabilité de leur comportement. Ils se présentent en phénoblastes xénomorphes, les uns très frais et permettant les mesures optiques, d'autres où les clivages sont plus ou moins remplis par la séricite d'altération, constituant au stade le plus avancé un feutrage important. Cette séricitisation progresse de façon irrégulière ; c'est ainsi que l'on observe une section où la partie droite du feldspath est totalement envahie par la séricite, alors que la partie gauche est intacte avec de fins clivages.

Les plagioclases altérés sont aussi parcourus de traînées limoniteuses. D'autres sections englobent de la Biotite ou de la Muscovite. Enfin, certains assemblages quartzo-feldspathiques ont écrasé les bordures des micas.

Le *Microcline sodique*. Assez rare dans la lame, ne présente rien de particulier.

La *Biotite*, très abondante, est en longues plages où bien peu se rencontrent encore à l'état frais. Elles ont perdu une partie de leur polychroïsme, et leur couleur est brun très clair, presque lavé. On observe une intense transformation en chlorite, laquelle présente au polarisant des tons violets, quelques inclusions d'Apatite et de nombreuses auréoles pléochroïques autour de cristaux de Zircon.

Le long des clivages p, exsudation importante de produits opaques, en granules, Ilménite ou Magnétite, ou en aiguilles noires de Rutile formant la Sagenite.

Les sections de Biotite se rangent, suivant une disposition assez anarchique, autour des Plagioclases et de la Cordiérite qui les ont repoussées ; à peine décèle-t-on un début d'alignement de ces sections.

La *Muscovite* est à Saint-Brancher presque aussi abondante que la Biotite. Ses couleurs de polarisation montent dans les tons élevés, ce qui est normal dans les roches métamorphiques.

La *Cordiérite* abonde dans toute l'étendue de la préparation,sous forme de sections remarquablement rondes, constituant en quelque sorte des îlots baignant dans une matrice quartzo-feldspathique, bien visible au faible grossissement. Rarement intacte, sauf au centre des minéraux, elle est entièrement transformée en Gigantolite ; il n'y a pas de Pinite comme à Moulin-de-Main, mais il n'est pas possible de préciser dans le cas envisagé si la cordiérite est passée d'abord par cette phase d'altération.

Les amas de Gigantolite, tout comme à Empury, peuvent être fracturés, et les intervalles comblés par de minuscules lamelles de Biotite et de Muscovite ; ailleurs, certaines plages englobent les phyllites formant des complexes classiques.

Conclusions à cette étude pétrographique.

Si l'examen microscopique des différents échantillons d'anatexite prélevés en divers points du gisement décèle partout les mêmes constituants minéralogiques, nous avons noté pour ces roches des changements de faciès et des variations dans les proportions relatives des minéraux. Retenons toutefois — ce qui assure au massif une certaine unité —l'importance de la Cordiérite, et à un moindre degré celle de la Biotite, et la rareté de la Muscovite.

Mais l'analyse chimique va faire éclater une hétérogénéité plus accusée encore.

COMPOSITIONS CHIMIQUES DES ANATEXITES A CORDIÉRITE DU MORVAN-NORD

Trois analyses chimiques de ces roches ont été effectuées :

1° Échantillon n° 55, Moulin-de-Main, ouest du gisement.

2° Échantillon n° 80, Chastellux, 1 km au nord du Pont de la Cure, centre du gisement.

3° Échantillon n° 75, Saint-Brancher, est du gisement.

Constitution chimique	Anatexite n° 55 Analyse n° 14 Mlle Doparis Clermont, St. Agro. mai 1955	Anatexite n° 80 Analyse n° 574 Mlle Y. Chaleil Clermont juin 1956	Anatexite n° 75 Analyse n° 563 Mlle Y. Chaleil Clermont mai 1956
SiO_2	55,65	65,80	60,25
Al_2O_3	21,16	15,72	17,46
Fe_2O_3	1,04	2,85	3,90
FeO	6,48	3,25	4,50
P_2O_5	0,12	0 ,18	0,19
TiO_2	0,95	0,65	0,70
MnO	tr.	tr.	tr.
CaO	0,76	0,95	0,60
MgO	3,78	2,10	3,00
K_2O	4,86	3,00	2,80
NaO_2	2,00	2,15	2,45
H_2O^+	2,10	2,75	3,50
H_2O^-	0,25	0,35	0,30
Total	99,15	99,75	99,65

Nous avons donc affaire à un massif hétérogène dans sa constitution chimique ; A. Cochet rapproche ces roches (p. 8 de son diplôme) des anatexites d'Aubusson ou de Boussac (Creuse) étudiées par R. Boineau et J. Nicaise en 1950.

Voici leur composition donnée par ces deux auteurs :

SiO_2	= 69,20	CaO	= 1,36
Al_2O_3	= 14,32	MgO	= 1,44
$Fe_2O_3 + FeO$	= 4,00	K_2O	= 4,45
P_2O_5	= 0,04	Na_2O	= 2,64
TiO_2	= 0,59	H_2O	= 1,99
MnO	= 0,10		
		Total	100,13

Nous partageons son point de vue en ce qui concerne les faciès de ces roches, très voisins dans les deux massifs, mais nous ne le suivons pas au point de vue de leur constitution chimique où les analyses font apparaître de notables différences. Il est vrai que A. Cochet avait tiré une analyse chimique des anatexites d'Empury à la suite d'observations faites à l'aide de la platine intégratrice. Les pourcentages calculés d'oxydes voisinent les données trouvées pour les anatexites de Boussac : SiO_2 en particulier, atteint 66 p. 100 et Fe_2O_3, 5,6 p. 100. Mais pour serrer la vérité de plus près, il est — à mon sens — préférable de passer par l'analyse

chimique classique, l'utilisation de la platine intégratrice s'avérant de surcroît délicate pour les roches à grain fin, telles que celles du Morvan.

Les anatexites du Morvan-Nord, se caractérisent surtout par une teneur exceptionnelle en Fer (8,24-6,46 et 8,90 p. 100 en Fe_2O_3 total) liée à l'abondance de la Cordiérite et de la Biotite, par leur richesse en MgO et K_2O, leur pauvreté en CaO. Na_2O est en proportion voisine dans tout le gisement. Quant aux teneurs en SiO_2 et Al_2O_3, elles varient en sens inverse.

A l'ouest du massif, les roches sont les plus pauvres en SiO_2 et les plus riches en Al_2O_3, où la teneur atteint 21,16 p. 100. Au centre, SiO_2 a sa valeur maximum et Al_2O_3 minimum. A l'est, les pourcentages des deux oxydes sont intermédiaires. Le métamorphisme ne s'est donc pas exercé sur ces roches de manière uniforme.

Compositions virtuelles.

Échantillon n° 55.

Q	= 13,98	SiO_3Mg	= 9,40
Or	= 28,91	SiO_3Fe	= 9,50
Ab	= 16,77	Ma	= 1,39
An	= 2,78	Ilm	= 1,82
Cor	= 11,53	Ap	= 0,34
Coupholites	= 73,97	Barylites	= 22,45
Or/Plag	= 1,48	An %	= 24

Échantillon n° 80.

Q	= 35,70	SiO_3Mg	= 5,20
Or	= 17,79	SiO_3Fe	= 2,51
Ab	= 18,34	Ma	= 4,17
An	= 2,89	Ilm	= 1,21
Cor	= 7,45	Ap	= 0,34
Coupholites	= 83,17	Barylites	= 13,43
Or/Plag	= 0,80	An %	= 28

Échantillon n° 75.

Q	= 27,84	SiO_3Mg	= 7,50
Or	= 16,68	SiO_3Fe	= 3,83
Ab	= 20,96	Ma	= 5,57
An	= 2,24	Ilm	= 1,37
Cor	= 9,49	Ap	= 0,34
Coupholites	= 77,21	Barylites	= 18,61
Or/Plag	= 0,72	An %	= 17

Voici qui démontre bien la variabilité de constitution minéralogique de ces anatexites et la nécessité des analyses pétrochimiques. Les calculs des compositions virtuelles font apparaître pour les trois échantillons un pourcentage très élevé de corindon : 11,53 p. 100, teneur absolument exceptionnelle car elle ne dépasse que rarement 10 p. 100 d'après E. Bastin, 7,45 p. 100 et 9,49 p. 100. D'autre part, nous vérifions dans les trois

cas les inégalités $CaO < MgO$ et $K_2O > Na_2O$. Ces faits nous conduisent à admettre sûrement pour ces anatexites une origine para (E. BASTIN, 1909).

Roches	Paramètres C. P. I. W.							
	p	q	r	s	h	k	l	m
n° 55	II	4	1 (2)	2 (3)	1 (2)	1	1	3
n° 80	I (II)	3	3′	3	2′	1	1	3
n° 75	II	3′	1 (2)	3	2 (3)	1	1	3

Échantillon n° 55. Moulin-de-Main.

Le calcul des paramètres C. P. I. W. montre qu'il s'agit d'une roche quartzique. Mais à la différence des anatexites du sud-ouest du Massif Central décrite par M. ROQUES (1941), où l'importance de l'apport magmatique se soldait par l'apparition de roches à caractères granitiques très accusés (p = 1), ici la valeur du paramètre p = II nous donne bien une roche éruptive, mais qui tend vers une diorite quartzique. L'absence d'amphibole, minéral caractéristique des diorites, est compensée par la cordiérite qui concentre une bonne part des éléments ferromagnésiens.

Toutefois, l'on ne peut affirmer que cette formule magmatique annonce une diorite quartzique franche. Le haut pourcentage virtuel en orthose (28,9 p. 100) contre 19,55 p. 100 de plagioclases et les faibles valeurs des paramètres *r* et *s* rapprochent la composition de cette anatexite de celle des granites calco-alcalins, monzonitiques (Or/Plag = 1,48). Nous pouvons donc conclure que le métamorphisme, avec son puissant cortège magmatique, a imposé à cette roche d'origine sédimentaire des caractères intermédiaires entre ceux des granites calco-alcalins orthosiplagioclasiques et ceux des diorites quartziques.

Échantillon n° 80. Chastellux.

Ces anatexites diffèrent de celles de Moulin-de-Main, car le métamorphisme régional leur a imprimé le caractère de granite calco-alcalin hololeucocrate, plus faiblement monzonitique (Or/Plag = 0,80).

Échantillon n° 75. Saint-Brancher.

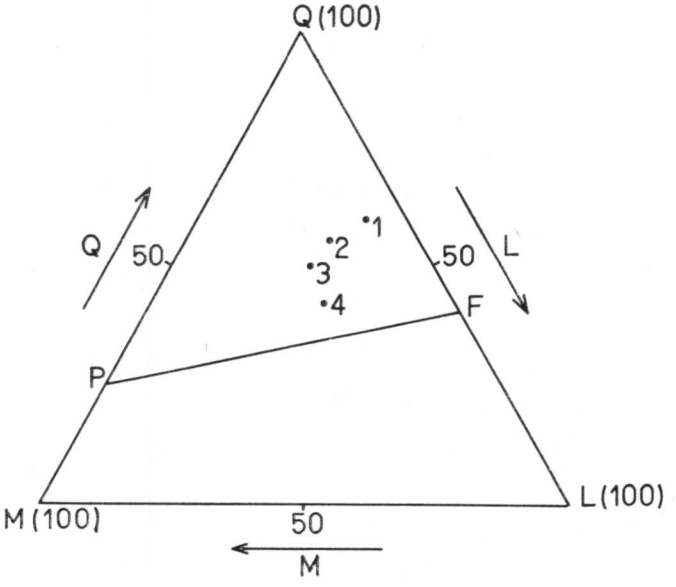
Le gisement de Saint-Brancher est très proche de celui de Moulin-de-Main au point de vue pétrochimique. Nous avons à nouveau des roches intermédiaires entre les granites calco-alcalins, mais moins monzonitiques (Or/Plag = 0,72), et les diorites quartziques.

Paramètres de Niggli.

N°	Si	al	fm	c	alc	ti	p	k	mg	qz
55	185,4	41,4	39,2	2,6	16,8	2,4	0,2	0,62	0,47	+ 17,8
80	295,4	41,48	35,84	4,58	18,05	2,15	0,27	0,47	0,39	+ 123,21
75	229,7	39,13	42,33	2,51	16,02	2,05	0,23	0,43	0,40	+ 65,66

Ces valeurs, presque identiques, sauf pour Si, confirment la dénomination d'anatexite accordée à ces roches pour l'ensemble du massif.

Diagramme de Niggli



1_ Granite Lormes
2_ Anatexite Chastellux
3_ Anatexite St Brancher
4_ Anatexite Empury

Graphique 2.

Paramètres Q. L. M. permettant la construction du Diagramme Triangulaire
Cas où Alc < al < alc + 2 c + fm

Paramètres	Roche 55	Roche 80	Roche 75
Q	41,7	55,1	48,5
L.....	31,6	26,8	26,9
M.....	26,7	18,0	24,6

L'ALTÉRATION PHYSIQUE DES ANATEXITES DU MORVAN-NORD RARETÉ DES COUCHES DE GORE

Les anatexites à cordiérite du Morvan-Nord se différencient du granite de Lormes par leur grande résistance à la désagrégation physique, à telle enseigne qu'il est difficile de découvrir des zones d'altération surmontant la roche-mère.

A Moulin-de-Main, la roche très dure n'est altérée qu'à la faveur de diaclases. Le long des rives de la Cure, autour de Chastellux, même comportement, et il est nécessaire de frapper violemment pour que le marteau en détache un échantillon. Tout au plus remarque-t-on un effritement superficiel qui ne dépasse pas une vingtaine de centimètres. Cependant, à 1 km au-delà du Pont de la Cure, au confluent des routes Lormes-Avallon et Chastellux-Saint-Germain-des-Champs, on peut observer, ce qui est exceptionnel dans la région, une épaisseur visible de gore de 1 m 60 reposant sur anatexite, lequel est recoupé par un filon de quartz. Il y a donc tout lieu de penser que cette altération s'est opérée sur place et n'a pas été compliquée de phénomènes de transport. Cette coupe très intéressante, nous fournira un excellent terme de comparaison avec les arènes granitiques.

Dans le massif de Saint-Brancher, à 1 km au sud de cette localité, les anatexites se montrent de prime abord peu altérées et n'ont pas donné naissance à des couches de gore. Mais traversées par de nombreuses diaclases, de faible épaisseur, leurs roches ont perdu leur patine et s'avèrent peu résistantes au choc du marteau. A signaler aussi la présence de nombreux filons de quartz les recoupant et d'avancées granitiques venant à leur contact.

Le long de la vallée du Cousin, les anatexites à texture de moins en moins nébulitique voient leur altération progresser rapidement, sans qu'il y ait pour autant élaboration d'un horizon Co. Mais tout en demeurant cohérentes aux affleurements, elles se pulvérisent avec facilité sous la simple pression des doigts, ce qui n'arrivait que rarement à Chastellux et exceptionnellement à Empury.

En somme, on peut retenir l'idée que les phénomènes d'altération physique ont eu plus de prise sur les anatexites de la partie est du massif, située dans l'Yonne, que celles de la partie ouest dans la Nièvre. Pour expliquer cette observation, il ne faut pas mettre en cause la structure qui ne varie que dans ses détails, mais plutôt la texture de la roche, dont le grain est plus gros dans la région de Saint-Brancher, plus vulnérable par conséquent aux agents de la dégradation physique et aussi la multiplication des diaclases entaillant davantage les roches, et conduisant l'eau plus profondément en leur sein, celle-ci demeurant la principale responsable de leur destruction (Cf. F. Rinne) (1949). Et c'est également la texture qu'il faut invoquer pour rendre compte des différences d'altération avec le granite porphyroïde de Lormes, les conditions climatiques et la topographie étant identiques.

CHAPITRE VI

ÉTUDE D'UNE CARRIÈRE DE GORE SUR ANATEXITE A CORDIÉRITE

Coupe de Chastellux (Yonne) à 1 km du Pont de la Cure.

Description de la coupe.

Elle est identique à celle de Lormes. Nous notons de haut en bas :

1° Un horizon A_0, de 5 cm, humifère, sur lequel repose la forêt (Quercus pedonculata avec une strate à Pteris aquilina et Calluna vulgaris).

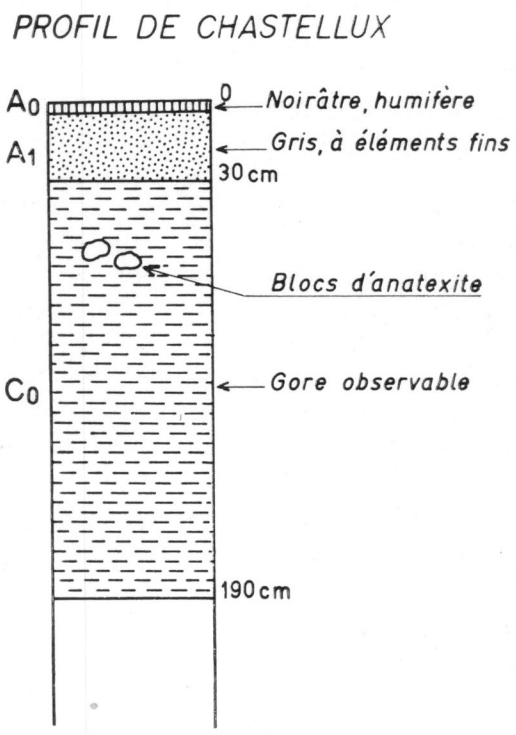


Schéma 5.

2° Un horizon A_1 (25 cm), de teinte grisâtre, à éléments fins.

3° Un horizon C_0, 1,60 m visible sur la coupe, mais qui atteint une plus grande puissance, car la roche-mère n'est pas observable. La schistosité cristallophyllienne bien atténuée de ces anatexites est toutefois

conservée dans le gore ; tout comme dans le granite, les feldspaths calco-sodiques sont réduits à une poudre blanchâtre très friable.

Dans la partie supérieure de cette zone, on rencontre aussi de gros blocs d'anatexite, les uns en forme de boule, d'autres plus anguleux qui ont échappé à l'emprise de l'altération. Un filon de quartz traverse la coupe, et l'on n'aperçoit aucune manifestation périglaciaire, pas plus que dans le reste du massif cristallophyllien — où d'ailleurs le matériel transportable est des plus réduits. La roche que l'on recueille à l'état frais à proximité de la carrière a donc été dégradée sur place.

I. — L'altération physique du profil de Chastellux.

A. — Analyse mécanique des horizons.

N° des échantillons	Horizon	Profondeur en mètres	Cailloux et graviers pour 100 de gore ou de terre totale
805	Al	0,15 m — 0,20 m	17,00
804		0,40 m	16,80
803		0,75 m	12,00
802	Co	0,90 m	10,00
801		1 m	14,80
800		1,50 m	9,60

Constitution physique de la fraction < 2 mm (Terre fine).

N° des échantillons	pH	Terre fine %
805	5,45	83,00
804	5,60	83,20
803	5,20	88,00
802	4,70	90,00
801	4,75	85,20
800	4,95	90,40

N° des échantillons	P. 100 de terre fine						
	Argile	Limon	Sables fins	Sables grossiers	Matières organique	H_2O	Total
805	16,55	15,85	23,00	40,68	2,98	1,58	100,66
804	17,30	10,30	25,72	42,78	tr.	3,42	99,52
803	21,00	12,10	24,30	42,00	0	3,46	100,86
802	23,40	5,60	20,24	46,19	0	3,64	99,07
801	21,20	16,20	20,36	41,58	0	0,94	100,28
800	13,60	13,90	26,32	44,30	0	2,36	100,48

La consultation de ces résultats analytiques appelle de notre part quelques remarques.

Si la pulvérisation mécanique des anatexites de Chastellux est peu intense (nous avons depuis observé une seconde carrière dans la région de Saint-André-en-Morvan), par contre, s'exerçant sur un matériel à l'origine plus fin que celui du granite, elle conduit à un gore très riche en particules < 2 mm (de 83 à 90 p. 100) ; à Lormes, les proportions oscillaient entre 52 et 61 p. 100, pour atteindre, mais seulement dans le sol, 72 à 76 p. 100.

Tout le long du profil observable, cette pulvérisation est assez homogène, surtout pour les sables grossiers et fins, dont la somme varie entre des limites étroites (64,30 p. 100 et 70,62 p. 100). Une fois l'altération physique amorcée, celle-ci a dû s'irradier dans la roche et la disloquer de manière uniforme, contrairement au granite.

Autre caractère spécifique du gore : sa *cohésion* dans les affleurements ; alors que l'arène est d'une extrême fragilité et facilement récoltée, le gore de Chastellux est compact ; il faut racler le profil à l'aide du marteau pour le recueillir. Il est évident que l'importance des fractions fines explique cette cohésion, les particules d'argile et de limon servant de ciment entre les plus grossières et assurant la solidité de l'ensemble de la formation.

Par contre, les horizons pédologiques de l'arène se retrouvent inchangés sur les anatexites où l'on passe sans transition du sol à la roche-mère.

B. — Analyse granulométrique.

N° des échantillons	X (en mm)	Md (en mm)	SO	K	$\sigma\alpha$	AS
800	0,395	0,47	1,08	0,246	+ 5,84	+ 0,32
801	0,537	0,63	1,09	0,231	+ 4,41	+ 0,47
802	0,589	0,69	1,09	0,275	+ 4,03	+ 0,55
803	0,572	0,67	1,10	0,258	+ 4,33	+ 0,53
804	0,607	0,71	1,12	0,257	+ 4,47	+ 0,48
805	0,591	0,665	1,11	0,207	+ 4,54	+ 0.38

Les analyses granulométriques viennent à l'appui des analyses mécaniques pour montrer la finesse des particules constituant le gore et le sol, en même temps que la remarquable homogénéité de l'ensemble de cette zone d'altération, s'opposant ainsi directement aux arènes granitiques. En effet, la moyenne géométrique X ne varie qu'entre d'étroites limites, et sa valeur est deux fois plus faible que dans la carrière de Lormes. De plus, la médiane Md ne s'écarte qu'assez peu de la moyenne géométrique, ce qui indique une faible hétérogénéité à l'intérieur même des prélèvements.

Dans tout le profil, la distribution granulométrique mesurée par le paramètre SO est presque parfaite, et le coefficient K dont les oscillations sont de peu d'amplitude rend compte d'une disposition homogène des

particules dans la quasi totalité de la courbe, les éléments fins étant les plus hétérogènes (AS positif).

La pulvérisation mécanique des anatexites a donc abouti à un matériel dont les caractéristiques granulométriques s'écartent beaucoup de celles des arènes.

ÉTUDE MINÉRALOGIQUE DES CONSTITUANTS DU GORE ET DU SOL DE CHASTELLUX

L'homogénéité dans la constitution physique de la coupe se retrouve dans la composition minéralogique du gore et du sol, si bien que nous pouvons décrire simplement un échantillon, ce qui évitera les redites, les analogies entre les divers prélèvements étant très marquées.

I. — Cailloux et Graviers. Echantillon n° 801.

Les cailloux et graviers qui ne représentent qu'une faible fraction du prélèvement (9 p. 100), contiennent des fragments de la roche et quelques associations de minéraux. Le quartz est très abondant, hyalin ; le microcline très résistant développe les plus grands cristaux, bien individualisés, ou recouverts d'une poussière de plagioclases où se mêlent des paillettes de biotite et des fragments de cordiérite verdâtre. On note aussi des assemblages plagioclases argilisés-biotite inégalement mordorée et cordiérite, le tout extrêmement fragile. La muscovite, très peu abondante comparativement à la biotite, se présente en plages très brillantes, généralement plaquées sur la purée plagioclasique.

II. — Les Sables.

Fractions 2 mm-315 μ.

Les minéraux ne sont pas totalement individualisés. On observe des cristaux de quartz, de forme variable, très nettement dominant, constituant des associations avec les plagioclases pulvérisés, logés parfois dans de minuscules géodes, et pouvant englober les phyllites. La dégradation de ces feldspaths est généralisée dans l'ensemble des fractions; il n'existe pas de variation dans le degré de l'attaque, qui est, semble-t-il, définitive.

Le microcline n'est pas très abondant, tout comme la cordiérite assez difficile à observer sous forme de cristaux verdâtres adsorbés sur les plages de quartz. Les phyllites sont associées, avec biotite dominante, assez peu mordorée, et peu chloritisée. A noter la présence d'un cristal de quartz moutonné, indice possible de recristallisation. Il n'y a pas trace d'éléments émoussés, ce qui confirme l'altération sur place.

Fractions 200-315 μ.

Presque tous les cristaux sont séparés, mais leur répartition diffère de celle observée dans les fractions grossières. Le microcline est peu important, alors que le pourcentage de la biotite s'élève ; l'altération de cette dernière est extrêmement variable. Quant au quartz, sa teneur diminue fortement, et la cordiérite est encore accolée à ce minéral.

Fractions 200 μ.

L'individualisation des minéraux est désormais acquise et les constituants essentiels deviennent alors les plagioclases et les phyllites, l'importance du microcline et du quartz s'amenuisant au fur et à mesure de la réduction de la taille des particules. Les plages de biotite prennent une teinte mordorée tandis que la muscovite est en lamelles plus ou moins déchiquetées.

En somme, nous retrouvons dans le domaine cristallophyllien les caractéristiques minéralogiques essentielles des zones d'altération du granite. Intense dégradation des plagioclases, résistance des feldspaths alcalins, concentration des phyllites dans les tamis de diamètres inférieurs, quant à la cordiérite, elle paraît dispersée dans l'ensemble des fractions.

Constitution minéralogique des sables.

Elle est calculée à partir des analyses chimiques, et les résultats, certes bien imparfaits, consignés dans le tableau ci-dessous, viennent à l'appui des observations effectuées à la loupe binoculaire.

Minéraux formés	Sables grossiers n° 8011	Sables fins n° 8012
Quartz	57,60	39,17
Microcline	25,70	21,17
Albite	4,68	12,00
Anorthite	—	3,14
Cordiérite	5,51	7,54
Sillimanite	4,20	9,77
Magnétite + Hématite	0,70	2,98
Rutile	0,11	0,45
Apatite	0,23	0,29
H_2O totale	1,36	3,49
Total	100,01	100,00

III. — Les Limons.

Tout comme dans le granite, l'étude de cette fraction s'avère délicate. Le microscope montre des cristaux de quartz d'une remarquable transparence, une poussière de feldspaths où l'on ne peut distinguer les alcalins des calco-sodiques. Le minéral le plus aisément identifiable est sans conteste la biotite, en nombreux fragments déchiquetés, mordorés, doué d'un faible polychroïsme. Quant à la cordiérite, il est impossible de l'isoler, même au fort grossissement.

IV. — L'Argile.

(Échantillon 8 014 extrait du gore anatexitique).

1° Spectre de Rayons X.

Ses caractéristiques sont les suivantes :

a) Réflexions à 5 Å, d'intensité moyenne correspondant à une illite suivie des réflexions à 4,47 Å intense, 3,34 Å de très forte intensité, 2,83 Å floue, 2,56 Å intense, 1,99 Å assez nette. Bien que l'équidistance réticulaire fondamentale de 10 Å (plan 001 de l'illite) n'ait pas été calculée pour ce spectre (la chambre de 57 mm de diamètre utilisée pour cette étude ne permettant pas toujours l'examen des raies centrales), la présence des autres raies caractéristiques ne laisse pas de doute sur le diagnostic.

b) 3 réflexions à 7,20 Å et 3,58 Å de force égale, et 2,33 Å d'intensité moindre qui correspondent à une kaolinite.

c) Réflexions à 3,34 Å et 4,26 Å du quartz.

Contrairement à l'argile extraite de l'arène ou du sol sur granite, nous avons affaire ici à une association de minéraux phylliteux.

2° Perte au feu.

Elle figure dans le tableau des compositions chimiques totales des fractions granulométriques composant le gore (An n° 11) et sa valeur est 10,70 p. 100. A la suite des travaux de E. Bastisse (1947), ce résultat indique un mélange du type Kaolinite + Illite. Sachant que l'Illite pure dont le type est fourni par un minéral de l'Illinois accuse d'après O. W. Ress une perte d'eau de 6,82 p. 100 entre 100° et 1 000°, et la kaolinite théorique 13,91 p. 100 entre ces mêmes températures, il est facile d'évaluer les proportions respectives des deux constituants qui sont :

Kaolinite : 42,2 p. 100.

Illite : 57,8 p. 100

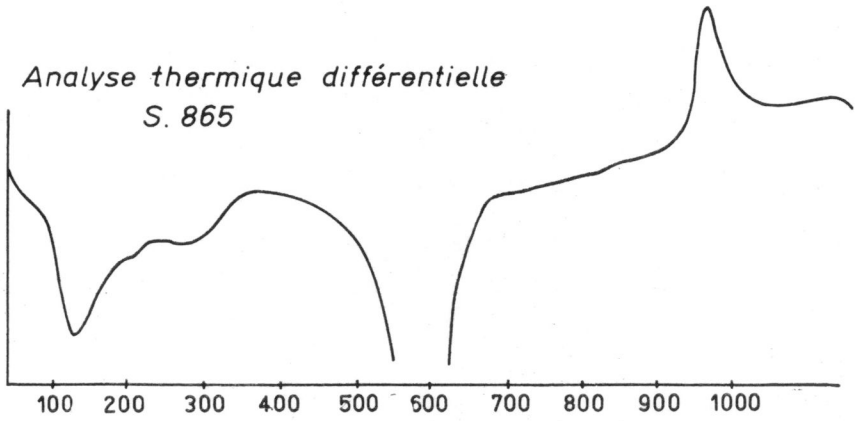
3° Analyse thermo-pondérale.

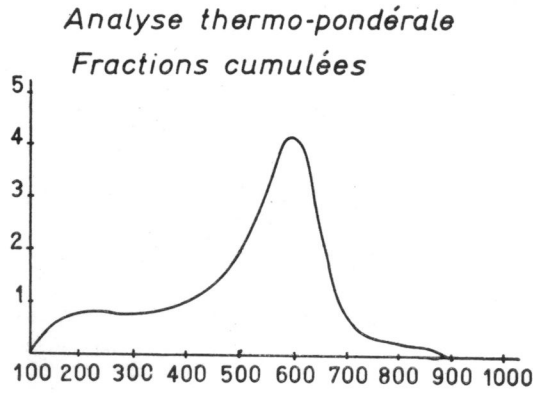
La courbe obtenue affecte une allure illitique, ce qui confirme la prépondérance de ce minéral sur la kaolinite, surtout, la courbe des fractions cumulatives est proche du type Illite.

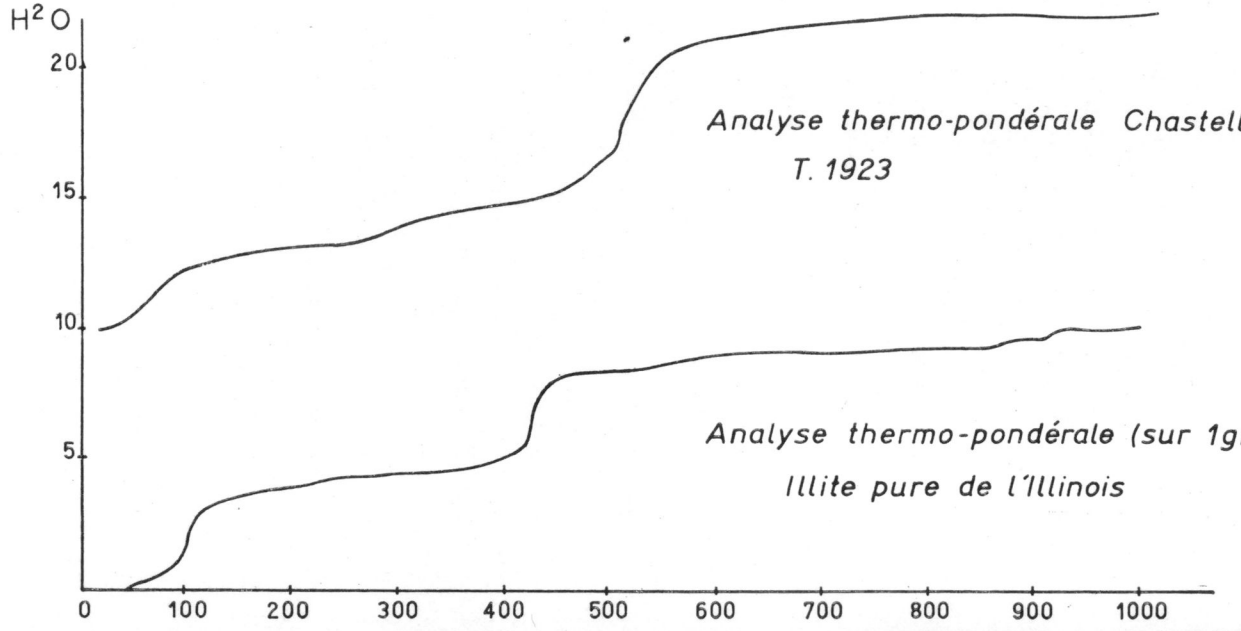
La perte totale en eau : H_2O — + H_2O + = 12 p. 100 (12,3 par l'analyse chimique) ; entre 100° et 1000°, elle se chiffre à 9,80 p. 100, au lieu de 10,70 p. 100, qui se répartit comme suit :

de 100 à 400°	2,6
de 400 à 600°	6,2
de 600 à 1 000°	1,0
Total	9,80

ARGILE DE CHASTELLUX







Pertes en valeurs relatives pour total = 100

de 100 à 400°	26,5 %
de 400 à 600°	63,3 %
de 600 à 1 000°	10,2 %
Total	100

Ce comportement rapproche le colloïde étudié du pôle Illite. L'analyse thermo-pondérale apparaît donc comme une méthode d'investigation très fructueuse complétant les données de l'étude aux rayons X, cette dernière définissant les types minéralogiques des argiles, dont les caractéristiques et propriétés sont alors précisées.

4° **Analyse thermique différentielle.**

Il est assez difficile de déceler le groupe Kaolinite + Illite à l'aide de cette méthode. En effet, les phénomènes thermiques manifestés par chacun de ces minéraux pris isolément sont illustrés par des courbes qui ne laissent pas subsister de doute sur leur identification ; certes ils se produisent aux mêmes températures, mais avec des intensités beaucoup plus fortes pour la kaolinite. Aussi, leur différenciation est-elle facile. Mais lorsqu'ils sont associés, la courbe qui enregistre l'ensemble des phénomènes est, dans le cas des argiles du Morvan-Nord, une résultante qui masque totalement l'effet dû à l'illite. Les crochets endothermiques à 100° s'ajoutent, sans être pour autant caractéristiques du mélange ; quant au grand crochet à 550°, il est dû essentiellement à la kaolinite, la manifestation très faible du phénomène illitique à cette température ne modifiant pas l'allure de cette fraction de la courbe.

Nous observons ici (S 865) un crochet endothermique important débutant un peu avant 100° (c'est sans doute le critère permettant le plus d'évoquer la présence du complexe Kaolinite-Illite, bien qu'il faille signaler que certaines kaolinites, notamment celle d'Ambolotarabe, se caractérisent par une inflexion très marquée à cette température), un second crochet endothermique à 280° attribué à la Gœthite, une troisième inflexion très prononcée, en forme de V ouvert à 500°, enfin un dernier crochet exothermique à 920° dû à la kaolinite. Cette analyse ne saurait conduire, à elle seule, à la détermination de deux minéraux ; le crochet moyen à 620° de l'Illite n'a pas apparu, s'étant raccordé avec le précédent, comme d'ailleurs dans beaucoup d'échantillons.

5° **Analyse chimique totale** (An n° 11) M. Sajot — J. Dejou).

Les rapports moléculaires, mis à part SiO_2/R_2O_3, un peu faible, confirment l'opinion émise par les examens du spectre et des courbes de déshydratation. Fe_2O_3/R_2O_3 est élevé et fournit un bon indice de l'association des deux phyllites.

Les bases sont surtout représentées par K_2O et MgO, importantes dans les illites, alors que CaO et Na_2O n'ont que des teneurs très faibles.

H_2O^-	1,63	Bases totales	5,03
H_2O^+	10,70		
SiO_2	42,22	SiO_2/R_2O_3	1,94
Al_2O_3	31,26		
Fe_2O_3	8,61	H_2O/R_2O_3	1,89
FeO	0,22		
P_2O_5	0,18	$Bases/R_2O_3$	0,23
TiO_2	1,11		
CaO	0,14	Fe_2O_3/R_2O_3	0,15
MgO	2,02		
K_2O	2,70		
Na_2O	0,17		
Total	100,96		

6° **Microscope électronique.**

L'examen de la fraction argile à l'aide de cet appareil permet d'observer les plaquettes hexagonales de kaolinite, assez rares dans les préparations, et à partir du grossissement 7000, les minuscules cristaux d'illites aux formes très irrégulières, et moins opaques aux électrons.

Conclusion.

La confrontation de ces techniques permet, comme dans le granite, d'aboutir à de bons recoupements et de conclure à la présence d'un complexe kaolino-illitique contenant de plus Quartz et Gœthite. C'est le type Westerwald de Rivière (1951). Ce résultat ne doit d'ailleurs pas surprendre puisque ce dernier auteur et Millot (1949) ont indiqué que ce groupe d'argile était de loin le plus fréquent. Nous verrons par la suite les conséquences agronomiques de l'existence de ce mélange dans les sols de la région.

II. — L'altération chimique des anatexites de Chastellux.

Tout comme pour le granite, les analyses des différents horizons du profil reposant sur anatexite sont très voisines et traduisent une altération chimique de faible amplitude. SiO_2, Al_2O_3 demeurent remarquablement stables. Les oscillations les plus accusées affectent Na_2O, MgO et surtout FeO, élément de la cordiérite. Quant aux phénomènes d'hydratation, ils apparaissent avec clarté.

L'étude des rapports moléculaires nous permet de classer comme suit les constituants chimiques, par ordre de mobilité croissante.

$$SiO_2,\ Al_2O_3 < K_2O < Fe_2O_3 < MgO,\ CaO < Na_2O < FeO.$$

1° *Constitution chimique des horizons du profil de Chastellux. — Étude des Rapports Moléculaires.*

Analyses chimiques de la Totalité des Fractions Minérales > 2 mm et de la Terre Fine < 2 mm.

N° des échantillons	H_2O^-	H_2O^+	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	P_2O_5	TiO_2	MnO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Total
R. 80 anatexite pure An. n° 574, Melle Chaleil, juin 1956	0,35	2,75	65,80	15,72	2,85	3,25	0,18	0,65	tr	0,95	2,10	3,00	2,15	99,75
N° 801 Gore Anatexitique — 1,20 m Rte de St-Germain des Champs. An. SAJOT-DEJOU n° 5	0,56	3,95	67,76	16,57	3,98	0,29	0,38	0,50	tr	0,36	0,91	4,20	0,72	100,18
N° 805 Sol 15-20 cm An. SAJOT-DEJOU n° 6	1,04	7,02	65,97	16,19	3,37	0,72	0,14	0,55	tr	0,53	1,07	3,60	0,75	100,95

Étude des Rapports Moléculaires.

N° des échantillons	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{SiO_2}{Fe_2O_3}$	$\frac{SiO_2}{FeO}$	$\frac{SiO_2}{K_2O}$	$\frac{SiO_2}{Na_2O}$	$\frac{SiO_2}{CaO}$	$\frac{SiO_2}{MgO}$	$\frac{SiO_2}{Bases}$
R$_o$ 80 Anatexite fraîche	7,11	60,88	24,35	34,12	31,20	64,23	21,0	10,50
N° 801 Gore anatexitique	6,97	45,16	282,25	25,66	98,17	188,16	49,08	21,00
N° 805 Sol. Prélèvement 15-20 cm	6,95	52,33	84,54	28,92	91,58	122,11	40,70	22,89

Nous avions obtenu les mêmes résultats pour le granite, et nous confirmons la résistance de K_2O à l'altération, la fragilité des plagioclases et des minéraux ferro-magnésiens.

2. — Constitution chimique des diverses fractions granulométriques du Gore de Chastellux.

Échantillon 801.

Ces analyses très intéressantes montrent de sensibles différences avec celles de l'arène de Lormes ; dans le gore, les sables grossiers sont très riches en SiO_2, 82,81 p. 100, et très pauvres en Al_2O_3, 9,58 p. 100 ; ces deux éléments accusent de grandes variations, au fur et à mesure de la diminution des particules, ce que traduisent parfaitement les rapports SiO_2/R_2O_3 qui tombent de 13,5 à 1,94.

Si FeO est uniformément réparti dans les diverses fractions, Fe_2O_3 augmente régulièrement des sables grossiers aux argiles, corrélativement avec la puissance d'adsorption des particules liée à leur finesse qui développe les phénomènes de surface. TiO_2 se concentre dans les parties fines ; K_2O est aussi fortement retenu par l'argile, fait à souligner pour l'amélioration des sols, alors que Na_2O est surtout abondant dans les sables fins.

La répartition des constituants à l'intérieur de chaque fraction est semblable à celle de l'arène granitique. La moitié de SiO_2 et K_2O est localisée dans les sables grossiers, alors que l'argile contient une bonne part de Al_2O_3 et la moitié de H_2O.

Le total contenu dans la dernière colonne qui reflète ainsi la composition chimique globale des éléments < 2 mm se rapproche beaucoup de l'analyse du gore, les cailloux et les graviers concentrant toutefois davantage de K_2O fixé sur le microcline.

3. — Étude de l'altération chimique globale des anatexites de Chastellux et de leurs minéraux.

L'évaluation d'un bilan chimique et minéralogique de l'altération des anatexites, par la méthode de Niggli-Burri, seule applicable en domaine cristallophyllien, se heurte à des difficultés plus sérieuses encore que dans celui des roches éruptives.

Outre les objections déjà soulignées, ces difficultés tiennent à la nature même de ces roches, l'ensemble des migmatites étant caractérisé par l'absence d'équilibre de leurs édifices minéralogiques. A Chastellux, par exemple, où l'on décèle au microscope quartz, microcline, cordiérite, biotite, et muscovite, il est impossible de calculer les proportions respectives de ces minéraux et partant, de présenter une composition moléculaire exacte. Nous avons en la circonstance tenu compte des

Étude de la composition chimique totale
des diverses fractions granulométriques composant le gore anatexitique de Chastellux (Yonne).
Éléments < 2 mm Échantillon 801.

Fractions analysées et nº des échantillons	P. 100 de chaque fraction				P. 100 de terre fine totale (An. phys. nº 801)				
	Sables grossiers nº 8 011 An. nº 8 SAJOT-DEJOU juin 1957	Sables fins An. nº 9 SAJOT-DEJOU juin 1957	Limon nº 8 013 An. nº 10 DEJOU-SAJOT juin 1957	Argile nº 8 014 An. nº 11 DEJOU-SAJOT juin 1957	Sables grossiers nº 8011	Sables fins nº 8 012	Limon nº 8 013	Argile nº 8 014	Totaux
Constituants chimiques :									
H_2O^-	0,23	0,29	0,69	1,63	0,09	0,06	0,11	0,34	0,60
H_2O+	1,13	3,20	6,61	10,70	0,50	0,65	1,07	2,27	4,49
SiO_2	82,81	70,34	53,47	42,22	34,43	14,32	8,66	8,95	66,36
Al_2O_3	9,58	15,34	24,33	31,26	3,98	3,12	3,94	6,63	17,67
Fe_2O_3	1,02	3,86	6,08	8,61	0,42	0,78	0,62	1,82	3,64
FeO	0,25	0,29	0,29	0,22	0,10	0,06	0,11	0,14	0,31
P_2O_5	0,20	0,16	0,09	0,18	0,08	0,03	0,01	0,04	0,16
TiO_2	0,17	0,64	1,35	1,11	0,07	0,13	0,22	0,23	0,65
CaO	0,11	0,78	0,42	0,14	0,05	0,16	0,07	0,03	0,31
MgO	0,51	0,97	0,95	2,02	0,21	0,20	0,15	0,43	0,99
K_2O	4,20	3,50	3,70	2,70	1,74	0,71	0,60	0,57	3,62
Na_2O	0,50	1,30	0,82	0,17	0,21	0,26	0,03	0,04	0,54
Total	100,71	100,67	98,80	100,96	41,88	20,48	15,59	21,39	99,34
Rapports moléculaires :									
SiO_2/R_2O_3	13,5	6,65	3,20	1,94					5,58
Bases/R_2O_3	0,65	0,54	0,30	0,23					0,39

observations microscopiques en calculant d'abord la cordiérite, très abondante en lames minces, et nous avons appliqué la réaction chimique des zones profondes du métamorphisme, savoir :

Muscovite + Quartz → Microcline + Sillimanite.

Il faut donc former du microcline, ce qui élimine la possibilité de constituer de la muscovite, et ensuite du quartz. Nous aurons donc pour Chastellux : Cordiérite, Sillimanite, Microcline et Quartz ; cette composition très imparfaite se rapproche cependant le plus de celle décelée au microscope où la proportion de muscovite est très faible et celle de la cordiérite, microcline et quartz prépondérante. Toutefois, elle ne traduit pas la teneur en biotite, relativement abondante et transformée partiellement en chlorite, de sorte qu'une fraction de K_2O ne sert pas à constituer du microcline dont la proportion se trouve ainsi surestimée.

Tableau des compositions minéralogiques moléculaires des 3 horizons dans la carrière de Chastellux.

Minéraux formés	Anatexite pure R. 80	Gore anatexitique nº 801	Sol nº 805
Quartz	27,63	37,75	36,86
Microcline	17,78	25,62	21,76
Albite	20,00	6,63	6,96
Anorthite	4,00	—	1,70
Cordiérite	22,99	7,19	8,37
Biotite	0,78	—	—
Sillimanite	—	14,42	13,02
Magnétite	3,08	0,69	2,29
Hématite	—	2,42	0,88
Rutile	0,45	0,34	0,40
Apatite	0,28	0,57	0,29
H_2O	3,10	4,51	8,06
	100,09	100,17	100,59

Constitutions minéralogiques des horizons de la carrière de Chastellux comparée à 100 *de l'anatexite à cordiérite de référence, en supposant toujours le quartz le minéral le moins altérable.*

Minéraux formés	Anatexite fraîche R. 180	Gore anatexitique nº 801	Sol nº 805	Pertes de C à A	
				% de C	% de chaque minéral
Quartz	27,63	27,63	27,63	0,00	0,00
Microline	17,78	18,75	16,30	1,48	8,32
Albite	20,00	4,85	5,21	14,79	73,92
Anorthite	4,00	—	1,27	2,73	68,25
Cordiérite	22,99	5,26	6,27	16,72	72,72
Biotite	0,78	—	—	—	—
Sillimanite	—	10,56	9,75	(gain 9,75)	(gain)
Magnétite et Hématite	3,08	2,28	2,37	0,71	23,05
Rutile	0,45	0,25	0,30	0,15	33,33
Apatite	0,28	0,42	0,22	0,06	21,43
H_2O	3,10	3,30	6,04	(— 2,94)	(gain 94,84)
Total	100,09	73,30	75,36	24,73	

Le gore anatexitique, assez semblable dans son aspect à une arène granitique, se caractérise à Chastellux par une concentration d'apatite, et une élimination importante des feldspaths calco-sodiques ; CaO a totalement disparu et on ne peut former de l'anorthite. Les pertes en microcline se chiffrent à 8,32 p. 100 (8,45 p. 100 dans le granite de Lormes).

Le bilan de l'altération fait ressortir des pertes totales plus importantes (24,73 p. 100), depuis l'anatexite fraîche jusqu'au sol, que celles enregistrées sur le granite porphyroïde de Lormes (17,01 p. 100). Si les phénomènes mécaniques de dégradation l'emportent en intensité dans le cas du granite, par contre, les phénomènes chimiques s'avèrent plus intenses dans les anatexites à cordiérite voisines. Il faut en voir la raison dans les différences de constitution de ces deux types de roches : les anatexites de Chastellux contiennent une proportion moins élevée de quartz (27,63 p. 100) au lieu de 36,23 p. 100, élément que nous avons considéré comme le plus résistant, et une teneur très élevée en cordiérite, minéral aussi vulnérable que les plagioclases et qui explique à lui seul les différences d'intensité des processus chimiques.

La présence d'une quantité élevée de sillimanite virtuelle (9,75 p. 100) s'explique par l'argilisation des feldspaths calco-alcalins encore plus dégradés que dans l'arène granitique et aussi probablement de la cordiérite et de la biotite ; ces minéraux constituent dans le gore et le sol une véritable purée où il est souvent impossible de procéder à une identification très précise.

CHAPITRE VII

L'ALTÉRATION DES ANATEXITES DE SAINT-BRANCHER (Yonne).

Description d'une coupe à 1 km au sud de cette localité.

Elle se différencie de celle de Chastellux, car l'horizon C_0 n'existe pas, comme d'ailleurs dans l'ensemble du massif, ce qui lui confère son originalité. Nous relevons en effet, de haut en bas :

1° Un horizon A_0 (5 cm), noir, très humifère, riche en débris végétaux, domaine de la forêt.

2° Un horizon A_1 (15-20 cm), à particules fines.

3° Un horizon C_1, très épais (3 à 4 m), où les anatexites peu dégradées physiquement, n'ont pas élaboré de gore. Il y a simplement disparition de la patine de la roche qui de plus s'avère peu résistante au choc du marteau. Mais à quelques mètres de cette coupe, des échantillons frais peuvent être récoltés, l'altération agissant toujours de façon désordonnée et déconcertante, selon des orientations imprévisibles.

L'étude de la dégradation de ces roches se limitera donc à un diagnostic chimique, l'examen du sol apportant un complément d'information sur la phase réduite de l'altération physique.

Observations Minéralogiques du Profil. La roche altérée. C_1. Échantillons 76 et 79.

Ces deux échantillons, d'une grande fragilité prennent une teinte ocre et se fragmentent aisément sous la simple pression de la main. Examinons à l'aide de deux lames minces n° 6 979 et 6 995 le comportement optique des minéraux.

Le quartz, dont les plages sont de dimensions très variées, prend une extinction roulante. Les feldspaths, contrairement à toute attente, ne sont guère plus séricitisés que dans la roche pure, une partie des minéraux montrant même de beaux clivages, d'une grande finesse. L'altération a surtout affecté la biotite dont les cristaux sont effilochés et cassés à leurs extrémités ; des paquets de fibres p se sont détachés et se trouvent isolés au sein de la mésostase, mais leur chloritisation n'est guère plus avancée que dans les échantillons frais. Ce minéral, très abondant, recèle de nombreuses inclusions de zircon et d'apatite.

Aucune modification du microcline et de la muscovite, rare d'ailleurs dans ces préparations. Ces dernières sont traversées de quelques fissures comblées par de longues traînées rouges de limonite.

En somme, la dégradation de ces anatexites de St-Brancher ne se traduit pas par des modifications des propriétés optiques de leurs minéraux. Nous rejoignons les conclusions énoncées pour le granite de Lormes, mais nous verrons qu'elles ne s'appliquent pas aux anatexites d'Empury : voici bien un nouvel indice de l'allure déroutante de phénomènes d'altération s'exerçant sur des roches de nature identique, mais qui impriment en définitive des comportements variés, si bien que chaque partie de ce massif acquiert une personnalité accusée.

Le sol.

L'analyse physique de l'horizon A_1 est la suivante (Échantillon 791).

pH	Terre fine	Argile	Limon	Sables fins	Sables grossiers	Mat. organiques	H_2o	Total
5,40	76,4	18,8	19,4	26,72	31,89	2,82	1,56	101,19

Il s'agit donc d'un matériel assez semblable à celui de Chastellux, mais où toutefois la proportion des sables grossiers est moins élevée. Nous ne parlerons pas ici des observations minéralogiques des phases grossières qui ne présentent rien de particulier, par contre, nous décrirons en détail la fraction argile, terme ultime de l'altération, et dont la détermination apporte des renseignements intéressants dans le domaine agronomique.

L'argile de Saint-Brancher extraite de l'horizon A_1 n° 791.

1° Spectre de Rayons X.

Il est en tous points identique à celui obtenu pour l'argile de Chastellux. Nous repérons :

a) Les raies caractéristiques de l'Illite : 5 Å de moyenne intensité, 4,47 Å et 3,34 Å très fortes, 2,97 Å floue, 2,56 Å intense, 1,99 Å d'intensité semblable à celle de 5 Å. Pas de raie à 10 Å qui a été sans nul doute absorbée.

b) Les réflexions à 7,20 Å et 3,58 Å intenses, et celle à 2,33 Å, plus atténuée, qui indiquent la kaolinite.

c) Les deux raies très intenses du quartz : 3,34 Å et 4,26 Å.

2° Analyse thermo-pondérale.

La courbe affecte une allure un peu moins illitique qu'à Chastellux, de même celle des fractions cumulées. La perte en eau totale atteint

12,4 p. 100 (H_2O^- = 2,4 p. 100, H_2O^+ = 10 p. 100. Il est intéressant de signaler que le départ d'H_2O est maxima à 900° et qu'au-delà, jusqu'à 1 000, le colloïde regagne 0,2 p. 100 de son poids, probablement par oxydation des molécules.

Répartition des pertes.

de 100 à 400°	4,00 %
400 à 600°	5,60 %
600 à 1000°	0,40 %
Total	10,00 %

Pertes en valeurs relatives pour total = 100.

de 100 à 400°	40 %
400 à 600°	56 %
600 à 1000°	4 %

Proportions des deux constituants.

Kaolinite	45 %
Illite	55 %

3° **Analyse thermique différentielle** (S. 866).

Elle diffère légèrement de celle de l'argile de Chastellux mais ne saurait à elle seule conduire à un diagnostic certain. Nous retrouvons un crochet endothermique à 100°, très important, indice possible du complexe Kaolino-Illitique, un second à 320° de même nature attribué à la Gœthite, une très grande inflexion endothermique à 500° de la Kaolinite accompagnée d'une très légère inflexion à 620° de l'Illite, enfin 2 crochets exothermiques à 850° et 950°, de forme arrondie, dus à la Kaolinite ; selon Mlle Caillère et S. Henin (1947), ces crochets accidentels se manifestent quelquefois sur ce minéral, et cela à une température inférieure ou supérieure à celle du crochet principal.

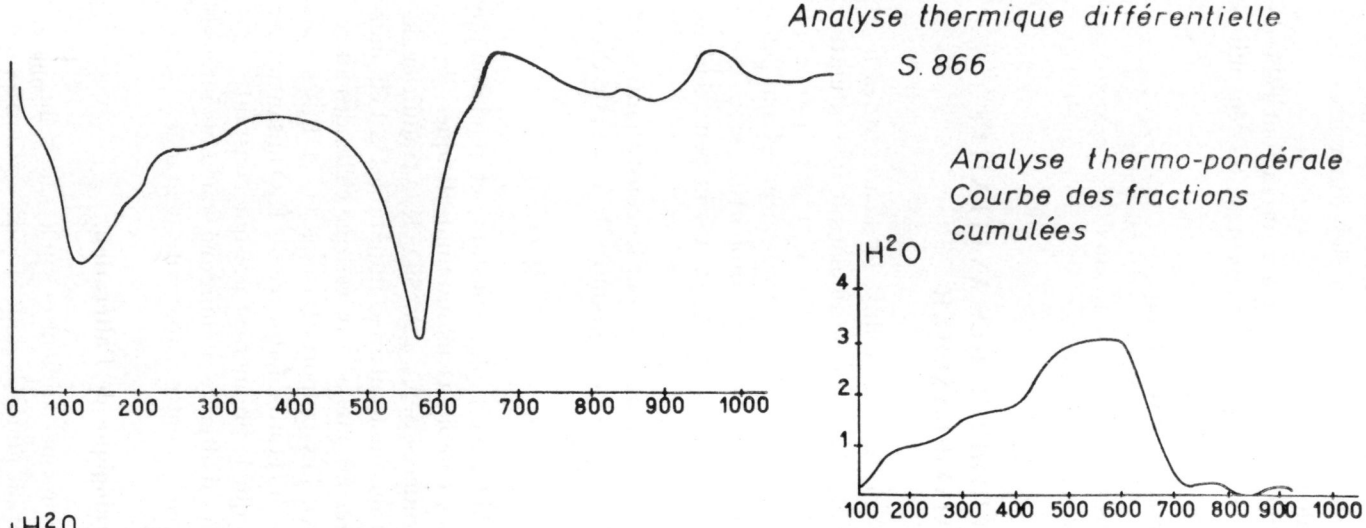
C'est encore le spectre de rayons X qui révèle l'identité du colloïde constitué de Kaolinite, Illite, Quartz et Gœthite, mais avec des caractères un peu plus rapprochés du pôle Kaolinite que dans l'argile de Chastellux.

4° **Analyse chimique totale.**

An N° 12. — M. Sajot-J. Dejou (décembre 1957).

H_2O-	= 2,33	Bases totales	= 5,45
H_2O+	= 10,97		
SiO_2	= 42,75	SiO_2/R_2O_3	= 2,13
Al_2O_3	= 28,49		
Fe_2O_3	= 8,80	H_2O/R_2O_3	= 1,82
FeO	= 1,37		
P_2O_5	= 0,23	Bases R_2O_3	= 0,30
TiO_2	= 0,56		
MnO	= 0,03	Fe_2O_3/R_2O_3	= 0,16
MgO	= 2,82		
CaO	= 0,16		
K_2O	= 2,15		
Na_2O	= 0,32		
Total	= 100,98		

ARGILE DE SAINT-BRANCHER



Schémas 7.

Ces résultats rapprochent l'argile de St-Brancher de celle de Chastellux et montrent qu'il n'existe en définitive que des différences assez ténues entre les deux échantillons.

Les valeurs du rapport SiO_2/R_2O_3, supérieur à 2, et surtout celle de Fe_2O_3/R_2O_3, très élevé, sont de bons indices du groupement des deux minéraux argileux.

5° Microscope électronique.

Il permet de déceler les cristaux de Kaolinite aux faces hexagonales normales, noyés au milieu des cristaux d'Illites, de forme quelconque.

L'ALTÉRATION CHIMIQUE DES ANATEXITES DE SAINT-BRANCHER

Contrairement aux anatexites de Chastellux, les analyses des horizons C et C_1 révèlent de sensibles différences, annonçant une altération chimique plus poussée. SiO_2 passe de 60,25 p. 100 à 71,33 p. 100 ce qui peut paraître de prime abord élevé, mais cet accroissement estcom pensé par l'élimination rapide de Fe_2O_3, et dans une proportion moindre de MgO et Al_2O_3. Par contre, les variations entre C_1 et A sont peu accusées, sauf pour les bases.

Les rapports moléculaires permettent de classer les constituants selon un ordre de mobilité croissante, en tous points semblable à ceux de Chastellux.

$$SiO_2 < Al_2O_3 < K_2O < Fe_2O_3 < CaO < MgO < FeO.$$

Mais ici le rapport SiO_2/Al_2O_3 n'est plus constant, et rend compte de la dislocation plus forte des combinaisons alumino-siliciques, de C à C_1, réactions pratiquement terminées de C_1 à A. SiO_2/K_2O traduit également d'importantes modifications moléculaires, imputables à l'élimination de la biotite bien que beaucoup moins accusées que celles des autres constituants, sauf surtout FeO. Les rapports Bases/R_2O_3 et Bases sans K_2O/R_2O_3 sont à cet égard très suggestifs, l'absence de K_2O faisant varier le rapport de 0,42 à 0,22 alors que le premier est presque constant.

En résumé, les phénomènes d'altération chimique sont plus intenses entre la roche fraîche et altérée, qu'entre l'anatexite dégradée et le sol

Bilan minéralogique de l'altération.

Nous nous heurtons aux mêmes difficultés qu'à Chastellux pour l'établissement d'une composition minéralogique des divers horizons du profil, et dans ce but, nous avons tenu compte des remarques déjà soulignées.

Analyses des différents horizons du profil

Echantillons	Horizons	H_2O —	H_2O +	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	TiO_2	P_2O_5	MnO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Total
Roche fraîche nº 75 — An. 563 Mᵉˡˡᵉ CHALEIL Clermont — Mai 1956.....	C	0,30	3,50	60,25	17,46	3,90	4,50	0,70	0,19	tr	0,60	3,00	2,80	2,45	99,65
Roche très altérée nº 77 An. 13 Sajot-Dejou	C_1	0,18	3,47	71,33	14,70	1,62	2,41	0,55	0,20	tr	0,50	1,64	1,92	1,97	100,49
Sol. nº 791 An. 14 Sajot-Dejou.	A	0,67	5,48	70,65	14,25	1,77	1,04	0,43	0,13	tr	0,47	1,00	3,20	1,10	100,19

Etude des rapports moléculaires calculés sur la totalité des fractions minérales

Échantillons	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{SiO_2}{Fe_2O_3}$	$\frac{SiO_2}{FeO}$	$\frac{SiO_2}{K_2O}$	$\frac{SiO_2}{Na_2O}$	$\frac{SiO_2}{CaO}$	$\frac{SiO_2}{MgO}$	$\frac{SiO_2}{\text{Bases tot.}}$	$\frac{\text{Bases}}{R_2O_3}$	$\frac{\text{Bases sans } K_2O/R_2O_3}{}$
Anat. fraîche.....	2,93	20,92	16,20	16,73	12,55	91,27	13,40	4,44	0,50	0,42
Roche très altérée.....	4,12	59,4	36,00	29,00	18,86	132,00	29,00	7,71	0,45	0,36
Sol nº 791.....	4,20	53,50	84,07	17,31	33,62	147,12	47,08	8,36	0,45	0,22

Ce bilan, certes imparfait, confirme cependant l'importance des phénomènes chimiques globaux qui affectent ces anatexites. On enregistre 50 p. 100 de pertes totales depuis la roche-mère jusqu'au sol, contre simplement 24,73 p. 100 à Chastellux. A mon sens, c'est le résultat le plus significatif que l'on peut tirer de ces calculs de composition minéralogique moléculaire.

Le microcline accuse 28,41 p. 100 de pertes (8,32 p. 100 à Chastellux), mais se montre toujours, et de très loin, le minéral le plus résistant. D'ailleurs cette proportion est surestimée puisque la biotite très abondante en lames minces n'a pas été formée dans le calcul. Les plagioclases s'éliminent dans des proportions très sensiblement identiques de même que la cordiérite.

Constitution minéralogique moléculaire des horizons de St-Brancher.

Minéraux formés	Roche fraîche n° 75	Roche très altérée n° 77	Sol n° 791
Quartz	20,75	40,78	42,22
Microcline	13,41	9,52	19,55
Albite	22,72	17,95	10,06
Anorthite	2,27	1,70	1,43
Cordiérite	23,22	12,94	8,95
Sillimanite	3,21	7,64	9,51
Biotite	5,79	3,44	—
Magnétite	4,09	1,70	1,89
Apatite	0,28	0,29	0,28
Rutile	0,51	0,39	0,28
H_2O totale	3,80	3,65	6,15
Total	100,05	100,00	99,82

Constitution minéralogique moléculaire des différents horizons de St-Brancher comparée à 100 *de la roche fraîche de référence* (en supposant le quartz le plus résistant).

Minéraux	R. 75 Anat. fraîche	R. altérée n° 77	Sol A 791	Pertes	
				% de C	% de chaque minéral
Quartz	20,75	20,75	20,75	0,00	0,00
Microline	13,41	4,83	9,60	3,81	28,41
Albite	22,72	9,12	4,94	17,78	78,25
Anorthite	2,27	0,86	0,70	1,57	69,16
Cordiérite	23,22	6,57	4,39	18,83	81,09
Sillimanite	3,21	3,88	4,67	+ 1,46	+ 45,48
Biotite	5,79	1,75	—	—	—
Magnétite	4,09	0,86	0,93	3,16	77,26
Apatite	0,28	0,15	0,14	0,14	50,26
Rutile	0,51	0,20	0,14	0,37	72,54
H_2O totale	3,80	1,85	3,02	0,72	18,95
Total	100,05	50,82	49,28	50,72	

Il semble que les différences de constitution minéralogique des deux massifs anatexitiques et l'intensité accrue de la circulation diaclasienne dans les roches de St-Brancher puissent expliquer la fragilité chimique de leurs édifices cristallins et leur vulnérabilité plus grande que celles de Chastellux. La somme de leurs minéraux résistants : quartz et microcline, n'atteint que 34,16 p. 100 contre 45,41 p. 100 à Chastellux, et les minéraux facilement dissociables : cordiérite et biotite, se trouvent en proportion plus élevée. De plus, le rôle destructeur de l'eau est ici bien mis en évidence.

CHAPITRE VIII

UN EXEMPLE D'INTENSE ALTÉRATION CHIMIQUE TRÈS LOCALISÉE

CAS DES ANATEXITES A CORDIÉRITE DE MOULIN-DE-MAIN près d'Empury (Nièvre).

Les types de dégradation chimique envisagés à Chastellux et à St-Brancher peuvent être considérés comme représentatifs des processus généraux d'altération qui se déroulent normalement dans l'ensemble du massif anatexitique, avec des variantes somme toute peu accusées. Mais nous avons pu découvrir un exemple d'altération chimique beaucoup plus violente, caractérisée par des départs de minéraux n'ayant pas de commune mesure avec ceux que nous avons étudiés : cette altération affecte les anatexites à cordiérite de Moulin-de-Main, le long de la Briniane, près d'Empury ; il s'agit en l'occurrence d'un phénomène isolé, très localisé, mais qu'il nous a paru intéressant d'approfondir, ne serait-ce que pour montrer l'extrême diversité des modes de dégradation au sein d'un même ensemble pétrographique.

Description de la carrière de Moulin-de-Main.

La coupe montre une différence considérable de résistance de la roche à l'égard de l'altération, et cela à l'intérieur de cette seule carrière, c'est-à-dire sur une quinzaine de mètres tout au plus.

SUR SA PARTIE GAUCHE, une zone en forme de poche a subi une pulvérisation intense ; celle-ci a donné naissance à un gore de 2 m de puissance environ et très fin — comme l'attestent les analyses physiques. On y observe le profil classique que nous étudierons en détail au point de vue physico-chimique : roche-mère-horizon C_0 de coloration jaunâtre, due aux oxydes de fer, qui s'atténue au fur et à mesure que l'on se rapproche du sous-sol. Cette coloration du gore anatexitique s'observe aussi dans les nombreuses carrières autour de Neuvic d'Ussel, et M. ROQUES (1941) précise qu'elle est caractéristique des anatexites du Tarn. Succèdent ensuite les horizons A_1 (40 cm), très caillouteux, et A_0, humifère, d'un noir intense où la forêt qui occupe le sol est à dominance de chêne et de charme.

Après une interruption de l'altération, où la roche conserve sa dureté initiale, nous arrivons dans la partie centrale de la carrière, qui affecte

l'allure d'un entonnoir, parfaitement délimité par deux diaclases qui se rejoignent à leur partie inférieure. Au-delà de leur intersection, il n'en subsiste plus qu'une seule, prenant une direction oblique et atteignant la base de la coupe. Ces fractures ont une largeur de 10 à 20 cm, et une longueur de 3 à 4 mètres avant leur jonction. En période de pluie, la circulation de l'eau y est très active, à telle enseigne que l'on croirait avoir

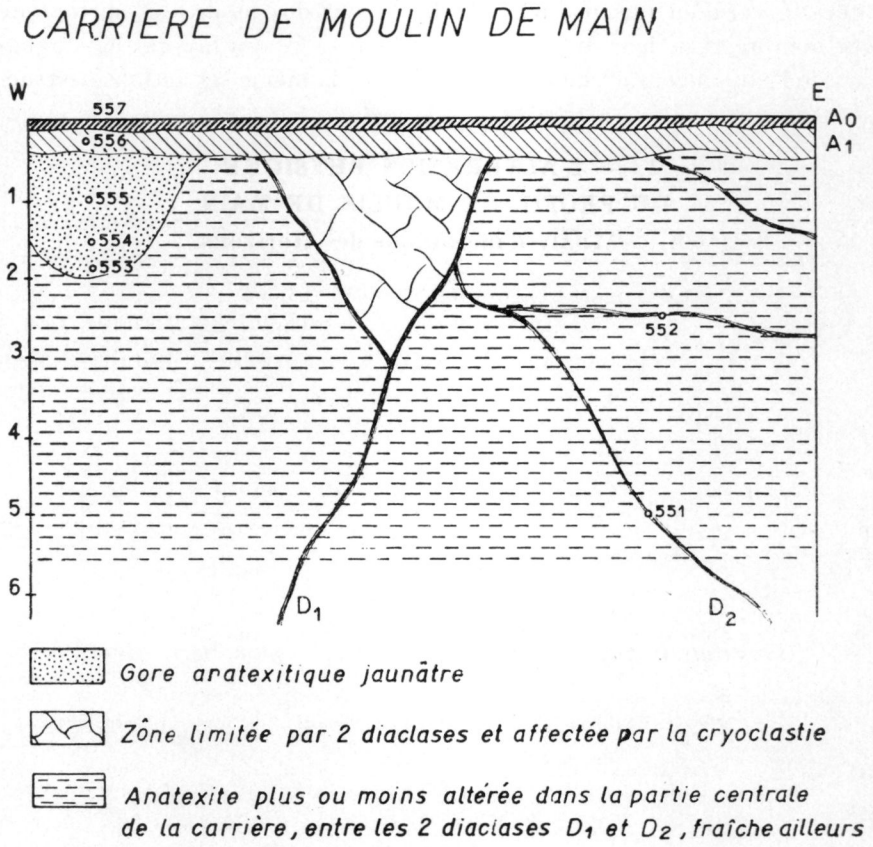


Schéma 8.

affaire à une petite source. A l'intérieur de l'entonnoir, on observe la présence d'un faisceau complexe de fissures plus petites, très anastomosées, où l'eau circule avec plus de lenteur. La roche qui a subi par ailleurs des effets de cryoclastie, n'existe plus à l'état frais : ce n'est qu'un assemblage de blocs dont la forme est plus ou moins arrondie, et de matériaux de la taille des graviers à celles des particules colloïdales. Nous avons pu observer de tels entonnoirs au sein des micaschistes à biotite, notamment dans le Cantal, au sommet de la Côte des Laurent, au-delà de Sansac-de-Marmiesse.

Dans la partie droite de la carrière, la roche redevient dure, difficile à détacher au marteau ; elle est cependant parcourue par quelques fissures ayant jusqu'à 5 cm de large, les unes horizontales, les autres obliques où s'accumulent les produits d'altération. Ces derniers ont été récoltés dans deux fractures différentes afin de procéder à leur examen.

L'allure de la dégradation physique *est donc sporadique*, et la coupe illustre bien le rôle des diaclases dans les phénomènes d'altération. Leur intensité varie en raison directe de la largeur des fissures et surtout de leur nombre et de leur disposition en réseau — ce qui favorise la stagnation de l'eau au contact de la roche — et par là même ses actions destructives.

I. — L'ALTÉRATION PHYSIQUE DU PROFIL DE MOULIN DE MAIN

A. — Analyse mécanique des Horizons.

N° des échantillons	Horizon	Profondeur en mètres	Cailloux et graviers p. 100 de gore ou de terre totale
557	A_0	0,05	40,60
556	A_1	0,40	37,50
555		1	0,22
554	C_0	1,50	4,66
553		2	7,70
552	Fissure	2,50 du sommet	8,60
551	Fissure	5 du sommet	20,65

Constitution physique de la fraction < 2 mm (terre fine).

N° des échantillons	pH	Terre fine %
557	4,6	59,5
556	4,6	62,5
555	4,8	99,78
554	4,8	95,34
553	4,9	92,30
552	4,95	91,4
551	5,3	79,35

N°	P. 100 de terre fine séchée à 105°					
	Argile	Limon	Sables fins	Sables grossiers	Matières organiques	Total
557	17,05	8,75	21,6	46,7	5,44	99,19
556	15,25	11,85	19,23	49,18	4,0	99,51
555	2,60	6,30	63,31	26,26	—	99,47
554	4,57	15,98	60,31	15,59	—	100,55
553	4,00	8,17	44,23	42,26	—	98,86
552	5,60	5,60	17,44	71,03	—	99,67
551	3,02	5,98	15,32	75,30	—	99,62

L'examen de ce tableau met en évidence les différences très marquées de constitution physique entre le gore et le sol. Le gore, assez homogène dans son ensemble où sa pulvérisation est très grande, est riche en sables dont le total dépasse régulièrement 75 p. 100, atteignant même 90 p. 100 pour un prélèvement, et avec un taux de sables fins très élevé. Par contre, les fractions fines sont pauvres. Ces caractères le distinguent de celui de Chastellux, où l'échantillon le moins riche en argile + limon ne contenait pas moins de 23 p. 100 de la terre fine.

Dans les horizons du sol, au contraire, il y a accroissement de la teneur du complexe d'altération, traduction de la pulvérisation des éléments à proximité de la surface, et corrélativement diminution des sables. Le tableau montre par ailleurs que cette opposition entre les compositions physiques s'effectue sur une distance verticale restreinte, de façon même brutale (entre 0,40 m et 1 m), ce qui peut donner une mesure de l'action en profondeur des agents de la désagrégation.

Quant à la richesse en cailloux et graviers du sol, elle est explicable par les effets du creeping, du fait de la pente. Mais cette distinction mise à part, les compositions physiques des deux horizons A_0 et A_1 ressemblent beaucoup à ceux du gisement de Chastellux.

En ce qui concerne les échantillons récoltés dans les fissures, il s'agit d'un matériel presque identique dans les deux cas, très bien pourvu en sables grossiers, mais avec une faible quantité d'éléments fins. Ces caractéristiques le placent, au point de vue physique, entre le gore et le sol ; mais il ne doit pas représenter seulement le mélange de ces horizons entraînés par les courants ; à cet amalgame s'ajoutent les produits de la dégradation sur place le long des fissures elles-mêmes.

B. — Analyse granulométrique.

Échantillons	$\bar{x}$ (en mm)	Md (en mm)	SO	K	$\sigma\alpha$	As
553	0,255	0,180	2,88	0,25	+ 5,85	— 0,82
554	0,109	0,096	1,53	0,10	+ 2,85	— 0,63
555	0,152	0,134	1,66	0,16	+ 3,85	— 0,39
556	0,49	1,26	2,85	0,36	+ 6,7	+ 1,86
557	0,52	0,84	3,80	0,40	+ 7,1	+ 0,84
551	0,62	0,74	2,04	0,28	+ 4,50	+ 0,50
552	0,39	0,42	2,19	0,25	+ 4,29	+ 0,20

Ces analyses granulométriques corroborent les résultats des analyses physiques et illustrent bien les oppositions dans les compositions du gore et du sol. Dans la zone d'altération, le matériel est extrêmement fin, très pulvérisé, plus réduit en poussière encore que dans le gisement de Chastellux où la valeur minima de x n'atteignait que 0,395 mm. De plus la finesse des particules s'accentue au fur et à mesure que l'on se rapproche du sommet. Si l'ensemble de la formation ne conserve pas la parfaite

homogénéité notée à Chastellux. elle est cependant satisfaisante. Les variations du coefficient K sont de peu d'amplitude, ce qui indique une distribution assez homogène dans la presque totalité de la courbe, les fractions fines étant les mieux triées (A S négatif).

Dans les horizons A_1 et A_0, nous trouvons un matériel très différent, qui n'est pas sans analogie au point de vue granulométrique avec celui des sols granitiques. Le grain moyen est plus grossier ; les écarts entre la médiane et la moyenne géométrique sont élevés (0,77 mm pour le n° 556), traduction de l'hétérogénéité à l'intérieur des prélèvements ; il en résulte une assymétrie importante, plus forte même qu'à Lormes (+ 1,86). Ces remarques plaident en faveur d'un transport de matériaux s'ajoutant aux éléments dégradés sur place.

Quant aux échantillons récoltés dans les fissures, leur grain moyen varie de façon sensible (0,39 mm et 0,62 mm pour *x*) ce qui n'est pas pour nous étonner, mais il est curieux de constater que le transport par l'eau, si faible et si sporadique soit-il, a homogénéisé les particules presque dans toute la distribution (K = 0,28 et 0,25), les fractions grossières étant les moins bien triées.

La désagrégation granulaire, très localisée à Moulin-de-Main, a donc atteint un stade avancé.

II. — ÉTUDE MINÉRALOGIQUE DES HORIZONS DE MOULIN-DE-MAIN

L'anatexite altérée. Zone C_1.

Le gisement de Moulin-de-Main permet de récolter les anatexites à des stades plus ou moins avancés de leur altération. Nous étudierons le comportement optique des minéraux à l'aide de deux préparations microscopiques.

Lame mince n° 5 859, correspondant a la roche 57

La roche est ici très altérée, se pulvérisant même sous la simple pression de la main. Malgré des difficultés certaines, un bonne préparation a pu cependant être réalisée.

Le quartz garde toujours sa limpidité et sa transparence ; cependant un assez grand nombre de plages possèdent une extinction roulante.

Les *plagioclases* sont très transformés ; les sections observées en lumière naturelle ont perdu leur brillant ; elles sont devenues ternes, nébuleuses ; en lumière polarisée, on constate l'accroissement du nombre des particules de *Séricite*, et une augmentation de la surface de leurs plages par rapport aux échantillons moins altérés. Ces particules sont incolores en lumière naturelle, jaunâtre entre nicols croisés.

Ces feldspaths sont aussi parcourus par des traînées jaunâtres de produits indéterminables, sans doute des oxydes de fer, mais peut-être aussi de nature argileuse.

Les *cristaux de microcline,* traversés par des veinules de quartz, voient leur transparence diminuer, et tout comme les plagioclases, sont recouverts de produits sans doute argileux et ferrugineux.

La *cordiérite,* assez rare dans la préparation, ce qui dénote l'hétérogénéité de la roche, n'existe plus à l'état frais ; elle est entièrement transformée en Pinite ; la Gigantolite est presque inexistante. Les conditions de formation de ce minéral sont donc complexes et sous la dépendance étroite du milieu ; la Gigantolite ne serait pas obligatoirement le terme ultime de l'altération, celle-ci pouvant s'arrêter au stade Pinite. On note toujours la présence d'un complexe de biotite chloritisée et de muscovite à l'intérieur de la Pinite.

La *muscovite* ne change pas, à l'inverse de la biotite, où il y a diminution de la teinte brune qui la caractérise lorsqu'elle est fraîche, perte plus ou moins accentuée du polychroïsme et transformation intense en chlorite.

Lame mince n° 4 168 étudiée par A. Cochet

Il s'agit encore d'un échantillon d'anatexite très altéré. Les mêmes observations formulées dans la lame précédente sont valables. Notons cependant une augmentation du nombre des cassures dans les plagioclases, ce qui dénote l'extrême sensibilité de ces minéraux et leur fragilité. Ces cassures sont anastomosées, en réseau, et occupées par la pinite qui s'insinue dans les espaces laissés vides.

Le quartz lui-même est brisé, avec des fissures très irrégulières comblées également par la pinite amorphe. Celle-ci semble donc douée d'un pouvoir de migration intense, pour s'infiltrer dans les interstices des cristaux.

La cordiérite, très abondante, est transformée ici en pinite et en gigantolite.

Comparaison microscopique des anatexites d'Empury, fraîches et altérées.

Par rapport à la roche intacte et au fur et à mesure que progressent les phénomènes d'altération, l'étude microscopique des anatexites d'Empury permet de dégager les observations suivantes :

Le *quartz* prend une extinction de plus en plus roulante ; et des cassures prennent naissance dans les cristaux.

Les *plagioclases* sont profondément altérés, fissurés, envahis par la Séricite le long des clivages.

Le *microcline sodique* ne subit pas la transformation en Séricite, mais se trouble ; nous n'avons pas relevé la présence d'inclusions dans la roche altérée, comme le signalent plusieurs auteurs, tels de LAPARRENT (1909) et KORZHINSKY (1940) dans les microclines des granites.

Très grande variabilité de comportement des plages de biotite. — Plus l'altération avance, plus le nombre des cristaux optiquement intacts diminue. Ils deviennent rares dans les échantillons très altérés. Il y a perte de la couleur brune du minéral, qui devient pâle, perte du polychroïsme, transformation en chlorite, deuxième minéral typique de l'altération, déferritisation avec exsudation de minéraux noirs le long des clivages.

Dégradation intense de la Cordiérite, presque entièrement transformée, même dans les roches peu altérées, soit en Pinite, soit en Pinite et Gigantolite ; elle présente toujours des diaclases qui logent un mélange très hétérogène de Biotite chloritisée, Séricite et Muscovite.

La *muscovite* conserve intacte ses propriétés optiques, n'est pas parcourue par des diaclases, et ne semble aucunement affectée par les phénomènes d'altération pourtant très intenses.

Contrairement à ce que nous avions observé pour les roches de St-Brancher, l'altération des anatexites d'Empury se traduit par de sensibles modifications des propriétés optiques des minéraux. Cette remarque ne doit pas d'ailleurs nous étonner, eu égard à la puissante dégradation chimique de ce gisement qui a durement atteint l'ensemble des constituants. Il y a donc ici corrélation entre le comportement optique et l'attaque physico-chimique.

Le gore et le sol. — Zones C_0 et A.

Les analyses physiques et granulométriques nous ont montré de notables variations entre le gore pulvérisé sur place et le sol dont une partie des éléments grossiers a été transportée ; mais il n'y a pas entre les deux horizons de différences dans les constitutions minéralogiques, ainsi que le montrent les examens à la loupe, si bien que nous pouvons décrire simplement un échantillon, ce qui évitera les répétitions inutiles.

1. — CAILLOUX ET GRAVIERS. — Échantillon 553 extrait du gore anatexitique.

Cette fraction très faible dans le gore (8 p. 100 en moyenne) atteint dans le sol, 40 p. 100. Elle est composée ici de fragments anatexitiques très dégradés, de teinte plus ou moins jaunâtre, très fragiles, se cassant comme des morceaux de sucre. On identifie facilement le quartz , rarement blanc, le microcline, les plagioclases très abondants et réduits en poudre, la biotite en minuscules paillettes noirâtres, allongées, la musco-

vite dont la proportion est beaucoup moins importante que celle de la biotite ; par contre, la cordiérite verdâtre associée aux plagioclases est moins aisément discernable.

2. — Les sables — n° 553.

Fraction 2 *mm*-500 μ. — Les mêmes caractères morphologiques s'observent dans ces fractions ; on y relève de petits fragments de roches associés aux divers minéraux non encore individualisés, le tout étant d'une extrême fragilité. Les minéraux ont une très petite taille, développant par conséquent une grande surface, ce qui permet une imprégnation totale de l'eau et par là l'accroissement de sa puissance érosive. L'orientation cristallophyllienne est conservée dans certains assemblages.

Fraction 500 μ-80 μ. — Les cristaux s'individualisent progressivement et leur séparation est achevée au stade 200-315 μ. On distingue surtout le quartz dont la teneur s'abaisse dans les fractions fines, la biotite qui prend une teinte de plus en plus mordorée et qui se concentre tout comme à Chastellux, les plagioclases probablement associés à la cordiérite. Peu de muscovite, sauf dans la fraction 125-80 μ.

Ce qui caractérise ces sables du gore de Moulin-de-Main, c'est, d'une part, leur abondance, et, d'autre part, la taille minuscule de leurs minéraux. Par ailleurs leur forme est très hétérogène ; ils sont déchiquetés, usés sur leurs bords ; il est rare de noter des cristaux aux faces nettes, comme on pouvait en repérer dans les prélèvements de Chastellux ou dans les arènes de Lormes. L'observation à la loupe confirme l'analyse physique : la désagrégation granulaire a été très intense dans ce gisement.

Constitution minéralogique des sables calculée à partir des analyses chimiques

(les phyllites ne figurent pas dans ces tableaux).

Minéraux formés	Sables grossiers n° 5 531	Sables fins n° 5 532
Quartz	32,55	35,18
Microcline	18,57	10,92
Albite + Anorthite	10,56	8,91
Cordiérite	17,60	17,94
Sillimanite (virtuelle)	10,47	14,03
Magnétite + Hématite	3,88	4,69
Ilménite	1,55	1,89
Apatite	0,28	0,28
H_2O totale	4,68	6,51
	100,14	100,35

Ces compositions sont très voisines à dominante de quartz, et montrent l'égale répartition de la cordiérite dans les deux fractions. Al_2O_3 restant, qui entre surtout dans les molécules des phyllites, est bloqué sur la sillimanite.

3. — Les limons.

Leur examen, très difficile au microscope polarisant, confirme les observations recueillies pour les échantillons de Chastellux. On distingue surtout le quartz, assez abondant, aux extinctions nettes, les minuscules cristaux de biotite très mordorée, et des ponctuations de minéraux opaques. Les feldspaths sont presque indiscernables.

4. — L'argile. — Echantillon n° 5 534 extrait du gore anatexitique.

Nous avons étudié la fraction argile en l'isolant du gore profond totalement dépourvu de matières organiques, très gênantes pour ces déterminations.

1° Spectre de Rayons X.

Il est identique à ceux des argiles de Chastellux et de St-Brancher. Le calcul des équidistances réticulaires permet de déceler :

a) Les raies caractéristiques de l'Illite : 10 Å intense, 4,47 Å, très forte, 3,34 Å et 2,97 Å d'intensité à peine moyenne, 2,56 Å assez forte, 1,98 Å, assez faible.

b) Les réflexions à 7,20 Å et 3,56 Å intenses, de la Kaolinite.

c) Les raies du Quartz : 3,34 Å, presque moyenne, et 4,26 Å forte.

2° Perte au feu.

Elle a été mesurée au cours de l'analyse chimique totale de l'argile et sa valeur est 9,15 p. 100. Nous avons affaire à un mélange de minéraux du type Kaolinite + Illite.

3° Analyse thermo-pondérale.

La courbe (T. 1926) est très proche du type illitique pur, de même celle des fractions cumulées, ce qui distingue nettement ce colloïde de ceux de Chastellux et St-Brancher contenant un mélange à peu près équilibré de kaolinite et d'illite. La perte en eau totale atteint 9 p. 100 (H_2O^- = 1,20 p. 100 ; H_2O^+ = 7,8 p. 100). Or l'analyse chimique réalisée à l'aide d'un four à gaz où la température maxima obtenue oscille autour de 800°, indiquait 9,63 p. 100. Mais si l'on calcule la perte en eau pour cette même température, à l'aide de la courbe thermo-pondérale, on trouve la même indication : 9,60 p. 100. Tout comme à St-Brancher, l'argile regagne donc du poids, du fait des oxydations, à partir de 800° jusqu'à 1 000°, et ceci d'une façon régulière ; le gain se chiffre à 0,60 p. 100 (0,20 p. 100 à St-Brancher), soit 6,6 p. 100 du total, ce qui est tout à fait remarquable.

Répartition des pertes en H_2O^+.

	Argile d'Empury	Illite pure d'après O. W. Ress - Ann. Agro nº 3, mai-juin 1947 (p. 408)
Pertes en valeur absolue :	%	
de 100 à 400°	2	1,54
400 à 600°	5,6	4,96
600 à 1 000°	0,2	0,32
Total	7,8	6,82
Pertes en valeurs relatives pour total = 100 :		
de 100 à 400°	25,6	22,60
400 à 600°	71,8	72,70
600 à 1 000°	2,6	4,70

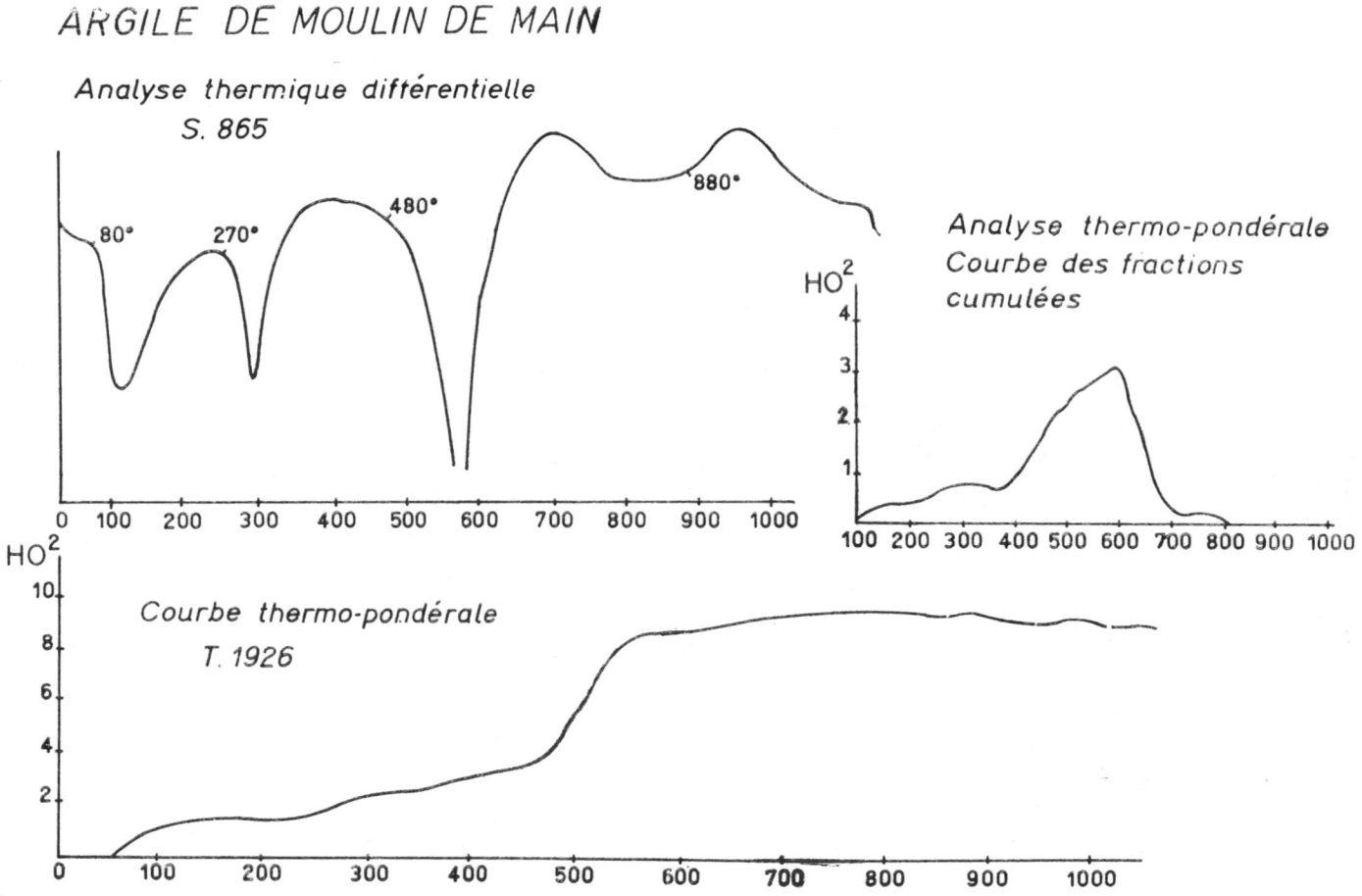
Ces considérations placent l'argile de Moulin-de-Main à proximité du pôle illitique et de fait le calcul des proportions des deux constituants donne les résultats suivants :

Kaolite : 14 %
Illite : 86 %.

4° **Analyse thermique différentielle** (S.865).

L'allure de la courbe ne ressemble pas à celle obtenue pour les argiles de Chastellux et de St-Brancher ; mais là encore cette méthode ne saurait suffire à elle seule pour établir un diagnostic précis. Elle débute par un crochet endothermique très prononcé à 80°, plus important que celui d'une Kaolinite pure, et exceptionnel chez les Illites sauf sur celle de Ward tracée au Muséum par Mlle Caillère. L'argile d'Empury présente avec ce type des affinités certaines dans la première moitié de la courbe. Aussi son interprétation est-elle difficile, et le mélange des deux minéraux n'apparaît pas clairement. Vient ensuite un deuxième crochet endothermique, aussi accusé que le premier et débutant à 270°, attribuable aux oxydes de fer : Gœthite-Limonite, qu'il est impossible de différencier par cette technique pas plus qu'à l'aide des données d'ordre chimique. Une troisième inflexion endothermique, de grande amplitude commence à 480°, indiquant surtout une Kaolinite, et la courbe se termine par une quatrième inflexion, cette fois exothermique, à 880° de la Kaolinite, mais de forme très arrondie et étalée, sans doute due au fer qui atténue le phénomène.

Si l'analyse différentielle décèle la présence des hydroxydes de fer associés aux minéraux argileux, elle met surtout en évidence la Kaolinite, mais laisse des doutes sur l'existence de l'Illite pourtant prépondérante car ses effets thermiques sont masqués.


ARGILE DE MOULIN DE MAIN
Analyse thermique différentielle
S. 865
80°
270°
480°
880°
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000
Analyse thermo-pondérale
Courbe des fractions
cumulées
HO2
4
3
2
1
100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000
HO2
10
8
6
4
2
Courbe thermo-pondérale
T. 1926
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000

Schémas 9.

5° Analyse chimique totale.

	Échantillon n° 5534, An. n° 21 M. SAJOT- J. DEJOU décembre 1957	Analyses de 2 illites pures (d'après LONGCHAMBON) Ann. Agro. mai-juin 1947, p. 408	
		n° 1	n° 3
H_2O^-	0,49	—	
H_2O^+	9,15	6,82	6,98
SiO_2	50,90	50,10	50,30
Al_2O_3	27,13	25,12	32,80
Fe_2O_3	6,09	6,79	—
FeO^+	1,00		
P_2O_5	0,48		
TiO_2	1,00		
MnO	tr.		
CaO	0,36	0,35	0,55
MgO	1,84	3,93	1,95
K_2O	1,30	6,93	6,72
Na_2O	0,37	0,05	0,52
Total	100,11	100,09	99,82
Bases totales	3,87	11,26	9,74
Rapports moléculaires :			
SiO_2/R_2O_3	2,79	2,88	2,59
H_2O/R_2O_3	1,67	1,31	1,21
Bases/R_2O_3	0,24	0,62	0,43
Fe_2O_3/R_2O_3	0,12	0,15	—

Hormis la pauvreté en bases, et surtout en K_2O, l'analyse chimique de l'argile de Moulin-de-Main l'apparente au type illitique, ce qui corrobore les observations antérieures.

6° Microscope électronique.

Cette étude est particulièrement intéressante car la préparation se distingue de celles déjà passées en revue.

1) On décèle en effet la *Kaolinite* sous deux aspects différents :

a) Des cristaux hexagonaux, en majorité.

b) Une fraction en forme de baguettes, de type vermiculaire, qui se différencient nettement des cristaux de sépiolite par leur épaisseur plus grande et par leurs écarts réticulaires caractéristiques (7,2 Å).

2) Ensuite les cristaux d'*Illite* tout comme à Chastellux et St-Brancher.

C. — L'altération chimique des anatexites de Moulin-de-Main.

Constitution chimique des horizons.

Étude des rapports moléculaires.

Analyses de la totalité des fractions minérales > 2 mm et de la terre fine < 2 mm.

Éléments	R. 55 An. nº 7 Mlle Doparis Clermont mai 1955	Anat. altérée nº 58 - An. 15 Mlle Doparis Clermont mai 1955	Gore nº 553 An. 16 Mlle Doparis Clermont mai 1955	Sol nº 556 Prélèv. à 40 cm An. 17 Mlle Doparis Clermont mai 1955
SiO_2	55,65	55,40	60,50	56,50
Al_2O_3	21,16	22,88	18,42	16,77
Fe_2O_3	1,04	2,91	4,15	3,30
FeO	6,48	2,45	1,02	1,58
CaO	0,76	1,12	0,31	0,34
MgO	3,78	2,22	2,20	1,52
P_2O_5	0,12	0,16	0,13	0,16
TiO_2	0,95	0,80	0,98	0,74
MnO	tr.	tr.	tr.	tr.
K_2O	4,86	3,28	3,32	2,34
Na_2O	2,00	2,10	1,27	0,73
H_2O^+	2,10	5,75	6,30	12,40
H_2O^-	0,25	1,20	1,80	2,45
Total	99,15	100,27	100,40	98,83

Les analyses du profil d'Empury annoncent des réactions chimiques plus actives encore qu'à St-Brancher, se déroulant suivant une intensité jamais égalée dans le reste du massif cristallophyllien. Depuis le substratum jusqu'à la base du sous-sol (le sol ayant été volontairement éliminé à cause des effets de creeping qui ont amené des matériaux étrangers), on peut vérifier l'importance de l'hydratation (H_2O passe de 2,35 p. 100 à 14, 85 p. 100), l'ampleur des variations de Fe_2O_3 et FeO, la grande mobilité de MgO, Na_2O, et surtout ici de K_2O, alors que dans les autres profils, sa valeur ne marquait que de faibles oscillations. D'ailleurs, les phénomènes d'altération sont aussi accusés entre la roche fraîche et la roche dégradée, qu'entre le gore et l'horizon A_1.

Les rapports moléculaires établissent un ordre de mobilité croissante des constituants légèrement différent de celui de Chastellux et St-Brancher :

$$SiO_2,\ Al_2O_3 < K_2O < MgO < Cao,\ Na_2O,\ Fe_2O_3 < FeO.$$

K_2O occupe toujours le 3e rang, immédiatement après Al_2O_3, presque constant le long du profil, mais le rapport SiO_2/K_2O n'est pas très éloigné de SiO_2/MgO, ce qui est exceptionnel dans la région. Ceci rend compte par conséquent de la fragilité des minéraux potassiques dans cette situa-

tion particulière, c'est-à-dire de la biotite, élément majeur de cette anatexite, mais aussi du microcline comme nous le constaterons par la suite. L'élimination de CaO et Na_2O exprime la vulnérabilité bien connue des plagioclases. Quant à FeO, ses transformations n'ont jamais été aussi importantes, ce qui confirme la destruction de la cordiérite, minéral fondamental dans l'ossature de la roche.

Étude des rapports moléculaires.

	Roche fraîche R. 55	R. 58 Anatexite très altérée	553, Gore d'anatexie	556, Sol Prélèv. à 40 cm
$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	4,49	4,17	5,58	5,74
$\frac{SiO_2}{Fe_2O_3}$	143,3	51,43	38,85	45,68
$\frac{SiO_2}{FeO}$	10,33	27,47	71,18	42,93
$\frac{SiO_2}{Fe_2O_3 \text{ total}}$	18,05	26,05	30,31	29,85
$\frac{SiO_2}{K_2O}$	17,98	26,80	28,53	37,84
$\frac{SiO_2}{Na_2O}$	28,88	27,66	49,09	80,03
$\frac{SiO_2}{CaO}$	68,38	47,70	182,2	155,17
$\frac{SiO_2}{MgO}$	9,79	17,00	18,33	24,79
$\frac{SiO_2}{\text{Bases totales}}$	6,60	8,62	12,60	16,86
$\frac{\text{Bases totales}}{R_2O_3}$	0,74	0,55	0,53	0,42

Constitution chimique des diverses fractions granulométriques du gore d'Empury n° 553.

L'examen du tableau permet de différencier dans le gore d'Empury deux fractions essentielles : d'une part, les sables, où les différences sont à peine sensibles entre les éléments grossiers et les éléments fins, et, d'autre part, le groupe argile-limon de composition chimique globale très comparable. FeO est remarquablement distribué entre les effectifs granulométriques, et nous vérifions à nouveau la concentration de TiO_2 dans les fractions fines et surtout de P_2O_5 puissamment retenu par l'argile alors que les limons se révèlent totalement dépourvus de ce pouvoir de rétention.

La répartition des éléments chimiques à l'intérieur de chaque fraction ne laisse qu'une faible part à l'ensemble argile-limon, les sables absorbant 87 p. 100 du total, à eux seuls, et cette répartition presque identique entre sables grossiers et sables fins est un argument supplémentaire en faveur de leur étroite parenté.

La dernière colonne du tableau exprime la constitution chimique totale de tous les éléments < 2 mm ; il n'y a que peu de différence avec celle de l'ensemble du gore, sauf pour K_2O davantage localisé dans les cailloux et graviers, fait déjà souligné dans l'étude de Chastellux, et qui assure une certaine unité dans les compositions chimiques des zones d'altération du Morvan-Nord.

Bilan minéralogique de l'altération.

Afin d'établir des comparaisons valables avec ceux de Chastellux et de St-Brancher, nous avons tenu à calculer un bilan minéralogique pour le profil d'Empury en choisissant la même paragénèse : cordiérite-sillimanite-microcline, bien conscient encore une fois de toutes les déficiences et de toutes les imperfections de cette méthode, d'autant plus graves en la circonstance qu'un minéral laissé de côté : la biotite, est ici surabondant et de ce fait déterminant dans le mécanisme de l'altération chimique. Mais par ailleurs, il ne semble pas qu'une autre paragénèse s'impose, le choix par exemple des phyllites conduisant à l'élimination radicale du microcline, bien difficilement concevable.

Malgré cette impossibilité de présenter un bilan qui grouperait tous les minéraux, une conclusion intéressante se dégage aisément de la consultation des tableaux : la puissance des phénomènes chimiques globaux qui frappe les anatexites d'Empury : 71,82 p. 100 de pertes totales depuis la roche-mère jusqu'à l'horizon A_1 contre 50 p. 100 à St-Brancher. C'est, je pense la notion qu'il faut retenir de cette étude.

Quant aux pertes des minéraux essentiels formés : cordiérite, plagioclases et microcline, il n'y a somme toute que des différences de faible amplitude ; elles sont pour tous très élevées, ce qui est normal pour la cordiérite et les feldspaths calco-sodiques, mais tout à fait contraire à l'opinion que nous avons développée pour le microcline. Remarquons toutefois que sa proportion dans la roche fraîche est surévaluée, puisque la biotite n'a pas été constituée, dans sa totalité, mais il n'en reste pas moins que même si l'on estimait la teneur en microcline à la moitié de sa valeur (10 p. 100), les pertes seraient cependant bien supérieures à celles calculées dans les autres régions du massif.

Pour expliquer cette intense dégradation chimique, très localisée semble-t-il, il faut faire appel à la puissante circulation des eaux dans une zone fortement affectée de fractures de tous calibres, les unes, les plus larges, favorisant les effets de sape sur les minéraux, les autres, les plus fines, assurant des contacts prolongés entre cette eau destructrice et les cristaux, et par là des réactions chimiques plus poussées. Dès lors, lorsque l'altération atteint un degré élevé, il y a uniformité dans son mode d'action vis-à-vis des différents minéraux, quelle que soit leur

Composition chimique totale des diverses fractions granulométriques du gore anatexitique profond de Moulin-de-Main près d'Empury (Nièvre) (Eléments < 2 mm) — N° 553.

Fractions analysées et n° des échantillons	P. 100 de chaque fraction				P. 100 de terre fine totale d'après An. physique 553				
Éléments	Sables grossiers n° 5531 An. n° 18 SAJOT et J. DEJOU nov. 1957	Sables fins n° 5 531 An. n° 19 SAJOT et J. DEJOU nov. 1957	Limon n° 5 533 An. n° 20 SAJOT et J. DEJOU déc. 1957	Argile n° 5534 An. n° 21 SAJOT et J. DEJOU déc. 1957	Sables grossiers n° 5531	Sables fins n° 5 532	Limon n° 5 533	Argile n° 5 534	Totaux
H_2O^-	0,34	0,47	0,64	0,49	0,14	0,21	0,05	0,02	0,42
H_2O^+	4,34	6,04	7,55	9,15	1,83	2,67	0,61	0,37	5,48
SiO_2	64,55	62,27	52,36	50,90	27,28	27,54	4,28	2,03	61,13
Al_2O_3	17,13	17,78	24,94	27,13	7,86	7,86	2,03	1,08	18,21
Fe_2O_3	5,75	7,03	6,86	6,09	2,43	3,11	0,56	0,24	6,34
FeO	1,00	1,08	0,74	1,00	0,42	0,48	0,06	0,04	1,00
P_2O_5	0,20	0,23	0,06	0,48	0,08	0,10	0,004	0,02	0,204
TiO_2	0,73	0,85	1,00	1,00	0,31	0,37	0,08	0,04	0,80
CaO	0,14	0,33	0,03	0,36	0,06	0,15	0,002	0,01	0,222
MgO	2,26	2,29	1,80	1,84	0,96	1,01	0,14	0,07	2,18
K_2O	3,05	1,80	3,40	1,30	1,29	0,80	0,27	0,05	2,41
Na_2O	1,15	0,80	0,95	0,37	0,49	0,35	0,07	0,01	0,92
Total	100,64	100,97	100,33	100,11	42,53	44,65	8,056	3,98	99,31
SiO_2/R_2O_3	5,22	4,76	3,04	2,79					4,67
Bases/R_2O_3	0,53	0,43	0,33	0,24					0,45

résistance intrinsèque à la décomposition physico-chimique qui s'estompe au point de s'effacer.

Il faut ajouter également qu'à Empury les agents de l'altération se trouvent en présence d'un matériel de constitution minéralogique bien particulière, que nous n'avons pas rencontré ailleurs. La proportion de quartz : 8,52 p. 100 est très faible à côté des teneurs calculées à Chastellux et St-Brancher ; les minéraux vulnérables : cordiérite, plagioclases, auxquels on peut joindre la biotite, constituent 63 p. 100 de la roche. Tout se passe comme si, l'architecture de la roche, instable par nature, une fois ébranlée, il y avait désorganisation et écroulement rapide des édifices moléculaires désormais les jouets des réactions chimiques.

Tableau des compositions minéralogiques moléculaires du profil d'Empury.

Paragénèse Cordiérite-Sillimanite.

Minéraux	R. pure 55	R. altérée 58	Gore 553	Sous-sol 556
Quartz	8,52	12,06	26,56	30,07
Microcline	20,85	19,63	20,00	14,58
Albite	18,01	19,07	11,42	7,00
Anorthite	2,81	4,77	0,57	0,87
Cordiérite	29,18	25,09	17,40	15,71
Biotite	13,50	—	—	—
Sillimanite	3,17	9,53	11,60	13,13
Magn. + Ilm.	1,02	3,03	4,45	3,50
Rutile	0,33	—	—	—
Apatite	0,29	0,28	0,27	0,29
H_2O totale	2,35	6,95	8,10	14,85
Total	100,03	100,41	100,37	100,00

Constitution minéralogique des différents horizons d'Empury comparée à 100 de la roche fraîche de reférence.

(Le quartz étant toujours considéré comme le minéral le plus résistant.)

Minéraux	R. 55	R. 58	Gore 553	Sous-sol 556	Pertes	
					% de C	% de chaque minéral
Quartz	8,52	8,52	8,52	8,52	0,00	0,00
Microcline	20,85	13,86	6,42	4,13	16,72	80,00
Albite	18,01	13,46	3,66	1,98	16,03	89,5
Anorthite	2,81	3,37	0,18	0,25	2,56	91,1
Cordiérite	29,18	17,71	5,59	4,45	25,73	88,1
Biotite	13,50	—	—	—	—	—
Sillimanite	3,17	6,73	3,72	3,72	+ 0,55	+ 17,3
Magn. + Ilm.	1,02	2,14	1,42	0,99	0,03	3,00
Rutile	0,33	—	—	—	—	—
Apatite	0,29	0,17	0,08	0,08	0,21	75,8
H_2O	2,35	4,91	2,60	4,09	+ 1,74	+ 74,0
Total	100,03	70,87	31,79	28,21	71,82	

Telles sont — à mon sens — les raisons que l'on peut invoquer pour rendre compte de cette altération exceptionnelle, figée au milieu d'un gisement d'anatexites très dures, mais non diaclasées. Le fait méritait d'être signalé, car il illustre également toute la complexité des problèmes qui se posent dans l'étude de la dégradation des roches, où le champ des recherches est immense.

CHAPITRE IX

CONCLUSIONS GÉNÉRALES. ESSAIS AU LABORATOIRE ET AGE DE L'ALTÉRATION DES ROCHES CRISTALLINES DU MORVAN-NORD

Le moment est venu désormais de brosser une synthèse très rapide des principaux résultats auxquels nous a conduit cette étude de l'altération des roches cristallines en Morvan-Nord.

La nature porphyroïde du granite de Lormes explique l'intensité de sa désagrégation physique acquise sur place et généralisée dans tout le massif, intensité qui peut même suprendre lorsqu'on mesure la puissance des zones arénisées, compliquées parfois par des apports périglaciaires plus ou moins accusés. Par contre, l'altération chimique est un phénomène ménagé, qui atteint surtout les plagioclases, et à un moindre degré la biotite. Aussi la représentation graphique de la progression de cette altération est-elle traduite par une ligne très courte AB, où le point d'aboutissement B, résultante des caractéristiques chimiques du sol, ne s'écarte qu'assez peu de la roche-mère qui lui a donné naissance (point A).

De plus le terme ultime des réactions physico-chimiques aboutit à une argile de type kaolinique.

Les anatexites, au contraire, ont un comportement différent en face des agents de l'altération, et leur étude est plus délicate, en raison de l'hétérogénéité de leur constitution chimique et de la difficulté impossible à surmonter pour leur fixer une composition minéralogique. Toutefois, il est facile de constater le faible développement de leur désagrégation physique comparativement au granite voisin, eu égard surtout à la finesse de la texture de la roche, et par contre une altération chimique toujours plus accentuée dans les 3 points du gisement observés, parce que s'exerçant sur un matériel plus vulnérable, cordiérite, plagioclases et biotite constituant au moins 50 p. 100 de la roche. Cette altération ne se développe pas de façon uniforme ; ses variations atteignent une grande amplitude, et nous avons classé comme suit les 3 profils par ordre d'intensité chimique croissante : Chastellux, St-Brancher, Empury.

Nous allons d'ailleurs comparer graphiquement l'importance de ces phénomènes pris dans leur ensemble, à l'aide d'un unique diagramme de NIGGLI où nous inscrirons également l'altération du granite de Lormes.

Coordonnées triangulaires Q. L. M. (Calculs de Niggli).

1° *Anatexite de Chastellux.*

	Roche fraîche	Gore	Sol
Q	55,1	62,2	62,75
L	26,8	21,4	20,50
M	18,0	16,3	16,75
	Point C	Point C′	Point D

2° *Anatexite de St-Brancher.*

	Roche fraîche	Roche altérée	Sol
Q	48,5	64,1	66,4
L	26,9	21,1	20,6
M	24,6	15,8	13,0
	Point E	Point E′	Point F

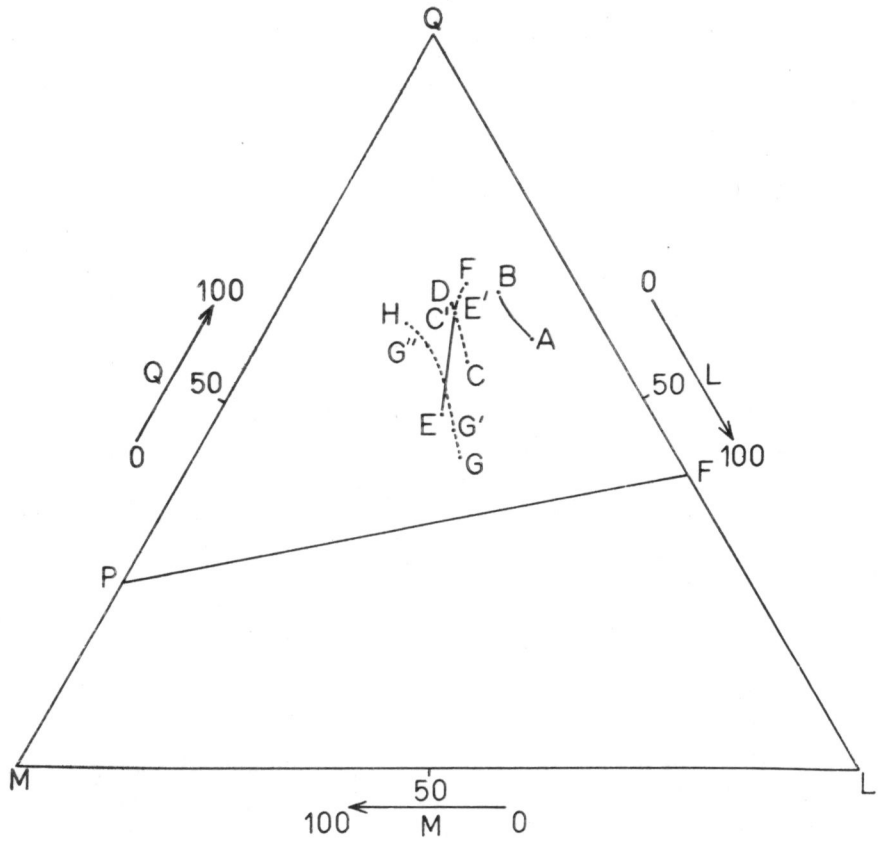
3° *Anatexite d'Empury.*

	Roche fraîche	Roche altérée	Gore	Sous-Sol
Q	41,7	47,7	56,0	60,6
L	31,6	28,6	21,5	16,5
M	26,7	23,7	22,5	22,9
	Point G	Point G′	Point G″	Point H

La seule lecture du diagramme permet de retrouver tous les résultats de l'étude chimique de l'altération, la progression de cette dernière étant mesurée par la plus ou moins grande longueur de la courbe décrite par le point représentatif de ces phénomènes depuis la roche-mère jusqu'au sol. La courbe CD qui est presque une droite, témoigne d'une altération au rythme régulier chez les anatexites de Chastellux, et légèrement plus accentuée que celle du granite de Lormes (AB). Or, l'analyse avait révélé respectivement 24 p. 100 et 17 p. 100 de pertes totales. La ligne EF (anatexite de St-Brancher) est 2 fois plus longue que CD : 50 p. 100 et 24 p. 100 de pertes par le calcul. Quant à la courbe GH, la plus irrégulière, sa longueur est approximativement 2,5 fois CD : 71 p. 100 de pertes à l'analyse minéralogique. Cette représentation graphique est par conséquent très suggestive et corrobore parfaitement les données du laboratoire.

Ajoutons enfin que l'altération des anatexites conduit à un mélange de minéraux argileux du type kaolinite + illite, celle-ci pouvant même devenir prépondérante.

D'autre part, les observations minéralogiques confirment les conclusions de nombreux chercheurs, notamment Jacques de LAPPARENT (1909), P. BIROT (1949) et D. COLLIER (1951), sur la vulnérabilité comparée des minéraux devant les agents de la désagrégation physico-chimique parmi lesquels l'eau et les diaclases ont un rôle majeur. Nous rangerons par ordre de résistance croissante : microcline, biotite, cordiérite et plagioclases.



Graphique 3. — Lignes AB — granite Lormes EF — anatexite St-Brancher CD — anatexite Chastellux GH — anatexite Empury.

Renseignements tirés de quelques essais expérimentaux sur les anatexites à cordiérite.

Grâce à l'amabilité de M. DERRUAU qui m'a largement ouvert les portes de son Institut, quelques essais de laboratoire ont pu être réalisés dans le but de noter le comportement des anatexites du Morvan en face de conditions climatiques artificielles plus violentes que celles qui règnent à l'heure actuelle dans la région, et qui sont sensées provoquer une alté-

ration plus rapide et par conséquent observable dans un délai relativement court. Les échantillons ont été placés durant 21 mois dans une étuve où la température oscillait entre 45 et 65° ; de plus ils baignaient dans l'eau distillée jusqu'à mi-hauteur en moyenne, parfois moins à la suite d'une évaporation plus forte. Les observations recueillies sont consignées dans le tableau ci-après,

Échantillons région d'Empury	Poids au début de l'expérience 28-6-1955	Poids au 18-1-1956	Poids à la fin de l'expérience 4-4-1957	Pertes ou Gains
	gramme	gramme	gramme	gramme
Anat. fraiche 55.....	16,5075	16,5002	16,5055	— 0,002
Anat. altérée 56.....	62,4872	62,5257	62,5630	+ 0,0758
— 56 a_1	24,0120	23,9155	23,9341	— 0,0779
— 56 a_2	33,9045	33,7722	33,7471	— 0,1574
Anat. très altérée 57.....	55,6700	55,4280	55,1918	— 0,4782
— 58	51,0767	50,9915	50,8890	— 0,1877
— 58*a*....	16,9373	16,9255	16,9281	— 0,0112
— 58*b*....	3,2868	3,2800	3,2808	— 0,006

La création de ce climat de type équatorial a mis en lumière un phénomène bien connu, qui s'est répété sur tous les échantillons sans exception : l'extraordinaire pouvoir de migration du fer, dont les anatexites du Morvan sont richement dotées. A l'issue de ces expériences, toutes les roches étaient colorées d'une teinte rouge limonite, témoignage de l'élimination rapide de ce constituant. Et si l'un des échantillons a pu gagner du poids, il faut sans doute invoquer l'oxydation du fer en cours d'expérience, suivie de son hydratation.

L'obtention d'un résidu, plus ou moins abondant, variable avec l'état initial de la roche, atteste que l'on peut reconstituer comme l'avait fait P. Birot la désagrégation granulaire. L'examen de ses éléments dont la longueur va de 1,5 mm à quelques μ, au moyen de la loupe binoculaire, est particulièrement intéressant. Ce résidu ne contient que des minéraux fragiles. Nous avons pu déterminer des plagioclases réduits en poudre et associés à la cordiérite verdâtre, et de fines paillettes de biotite plus ou moins mordorée ; absence totale de microcline et de muscovite ; ces résultats s'accordent bien avec les observations notées dans la nature.

L'âge de l'altération du granite et des anatexites.

Cette question est sûrement l'une des plus délicates et des plus sujettes à caution de l'ensemble de ce travail. Nous l'avions d'ailleurs abordée dans un mémoire déjà cité, rédigé avec la collaboration de J. André et M. Sajot (1956) à propos de l'étude de la carrière de Brassy. En effet, les zones d'altération en pays cristallin ne nous ont pas livré d'archives paléontologiques, qui auraient été si précieuses en la circons-

tance, si bien que nous ne pouvons formuler une opinion que d'après les observations stratigraphiques.

La description du profil de Brassy et l'examen d'autres carrières localisées autour de Montsauche et de Moux, où les arènes sont surmontées de matériel d'origine périglaciaire nous permettent d'affirmer sans ambiguïté l'antériorité des processus de l'altération au Würmien supérieur où ces transports se sont produits. D'autre part, nous savons que sous les couches de Brassy touchées par la solifluxion et la cryoturbation, se situe une zone intermédiaire avant l'arène en place, à allure quasi-stratifiée, remarquable par la régularité de ses dépôts, non affectés par les perturbations périglaciaires, et que nous pouvons imaginer comme ayant eu lieu dans des conditions calmes, sans heurts mais avec des effets de tassement successifs affectant l'allure d'une accumulation de type lacustre. Cette zone de plus de 3 mètres de hauteur coiffant l'arène de base est constituée de matériaux uniquement granitiques arrachés au socle et transportés durant une période où l'érosion devait être active ; à la suite des travaux de Y. Guillien (1955), nous l'avons datée du Villafranchien, marqué en Europe Occidentale, et en particulier dans la vallée de la Saône, par une « vigueur nouvelle de l'érosion » succédant au Pliocène tempéré et humide, où ses effets devaient être moins incisifs.

La couverture d'arène au-dessus du granite et les quelques rares couches de gore anatexitique sont remarquables par leur puissance et la finesse de leurs éléments, caractères qui témoignent en faveur de l'hypothèse d'une très longue période d'altération s'exerçant sur les socles originels pour aboutir aux faciès actuels. A Brassy — c'est d'ailleurs le seul point du Morvan-Nord où nous avons pu noter cette observation — l'arène de base se termine par une zone rubéfiée d'une épaisseur de 70 cm, à telle enseigne que M. Pouquet précisait au cours d'une visite l'analogie existant entre cette formation et celles de la Guinée Française. Il y avait là l'indice d'un climat tropical ayant régné sur le Morvan, et dont nous avons les nombreux témoins dans le tertiaire du Massif Central : « latérites » nées de l'altération des embréchites à Ardes-s/-Couze dans le Lembron près d'Issoire, argiles rutilantes sannoisiennes des bassins d'Aurillac et du Lembron, assises rouges sous les coulées volcaniques de St-Flour, toutes du tertiaire inférieur ; ce climat s'est d'ailleurs poursuivi dans la deuxième moitié de cette ère comme l'attestent les flores fossiles des environs d'Aurillac.

Par analogie avec les faciès du Massif Central, il n'est pas interdit — eu égard à l'importance relative de cette zone rubéfiée — de la placer au tertiaire, peut-être au Nummulitique où ces phénomènes se sont le plus généralisés dans cette partie de notre pays. Dès lors, l'altération des roches cristallines du Morvan-Nord aurait commencé à cette époque, où les processus chimiques l'emportaient en intensité sur la désagrégation

mécanique — parce que favorisés par une température constamment élevée et d'abondantes précipitations. Ce mécanisme se serait poursuivi durant la seconde moitié du tertiaire, avec des degrés dans l'importance de l'attaque, jusqu'à l'établissement au quaternaire d'un nouveau type de climat caractérisé par de longues périodes froides, suivies de phases de réchauffement. Les processus physiques auraient alors joué à plein, le gel et les brutales variations de température pulvérisant les roches déjà fragiles en fragments de plus en plus petits, élargissant et multipliant les diaclases, et parachevant leur dislocation. Ainsi, en Morvan-Nord, cette puissante altération physique aurait été précédée et préparée par une altération chimique, sans doute tertiaire, qui désorganisa les réseaux cristallins.

Au cours d'une réunion de l'Association Française pour l'Étude des Sols à Dijon, M. TINTANT mettait l'accent sur la durée très longue des processus d'altération physico-chimiques donnant les arènes qu'il faisait remonter « au moins au Villafranchien ». Nous partageons entièrement ce point de vue, en précisant une fois encore que le climat tertiaire eut sûrement son rôle dans cette altération.

CHAPITRE X

ÉTUDE COMPARÉE DES SOLS REPOSANT SUR GRANITE PORPHYROÏDE DE LORMES ET SUR ANATEXITE A CORDIÉRITE DE LA RÉGION D'EMPURY-CHASTELLUX

L'examen comparé des sols reposant sur les deux grands massifs cristallins du Morvan-Nord (granite et anatexite) dont nous venons de décrire les processus physiques et chimiques d'altération, est le complément indispensable de cette première série de recherches. C'est la phase ultime de ces phénomènes de dégradation que nous devons à présent envisager, dont le sol en constitue le produit, support de l'activité économique du pays essentiellement axée sur l'agriculture.

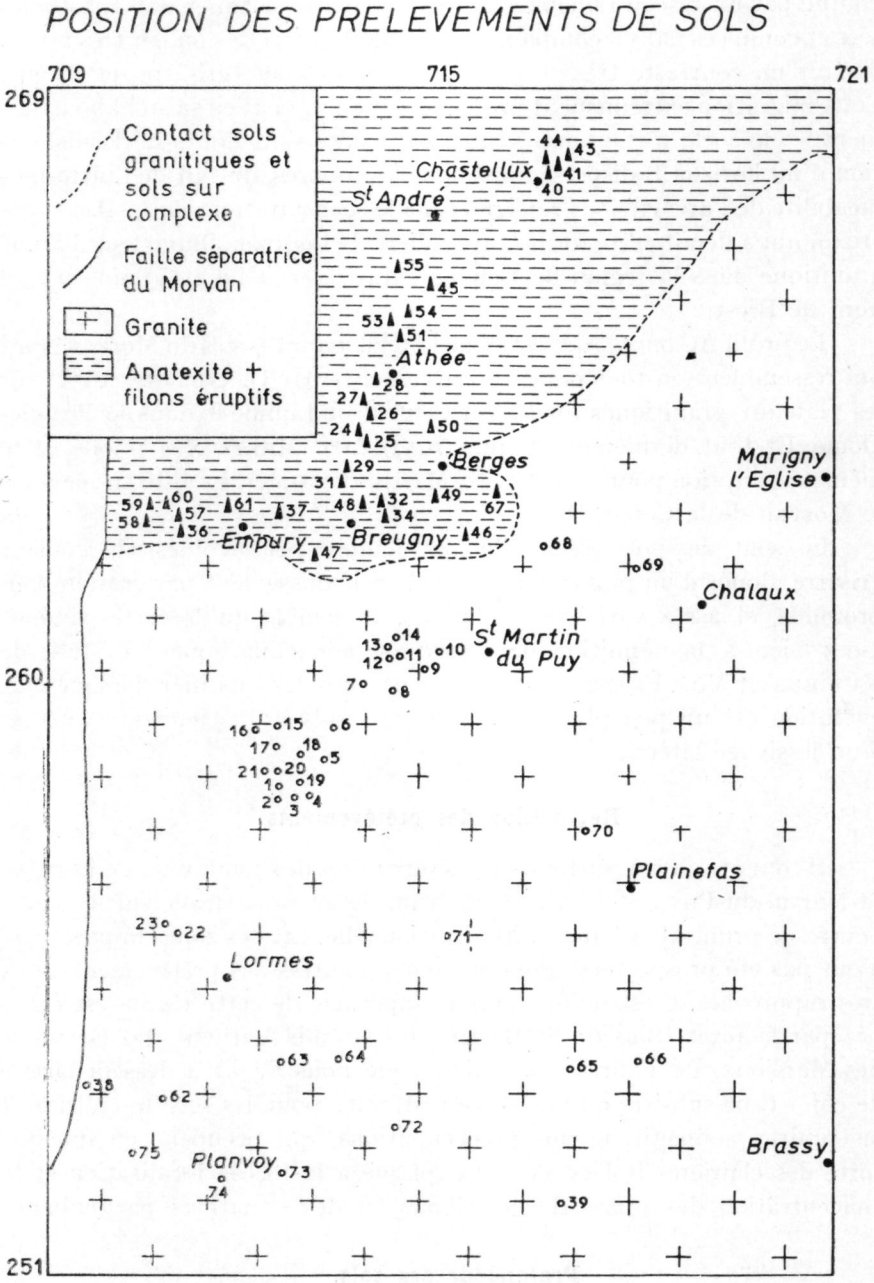
Les praticiens de cette partie du Morvan distinguent parfaitement ces deux formations géologiques et ont coutume d'attribuer aux sols qui les surmontent une fertilité différente ; selon eux, les sols établis sur anatexite sont de meilleure qualité que ceux reposant sur granite. Quelles sont les caractéristiques de ces sols, leurs analogies, leurs différences de composition et de structure, et dans quelle mesure l'opinion des agriculteurs est-elle jutifiée? C'est ce qui va désormais faire l'objet de nos entretiens.

I — LES SOLS SUR GRANITE.

a) Profil et étude physique.

Examen des profils.

Nous devons nous adresser à un sol forestier où les horizons sont parfaitement conservés, alors que les sols cultivés ne sauraient garder du fait de l'action de l'homme, leur disposition originelle. La carrière de l'Abattoir, près de Lormes, déjà décrite, peut nous servir comme type de profil. Nous observons un horizon A_0 peu épais (2 à 5 cm), noir où la végétation est à base de chêne, dominant; le hêtre s'y développe, mais il est beaucoup moins abondant ; vient ensuite un horizon A_1 d'entraînement (15 à 25 cm) et nous passons sans transition à l'arène C_0. Absence caractérisée d'horizon B, représenté très rarement à l'état diffus sous forme de traînées d'argile et de fer accumulées le long des diaclases. Le phénomène le plus saisissant à cet égard est inscrit dans une carrière d'arène à 2 km de Dommartin, sur la route nationale Nevers-Château-


POSITION DES PRELEVEMENTS DE SOLS
709
715
721
269
260
251
Contact sols granitiques et sols sur complexe
Faille séparatrice du Morvan
Granite
Anatexite + filons éruptifs
Chastellux
St André
Athée
Berges
Marigny l'Eglise
Empury
Breugny
Chalaux
St Martin du Puy
Plainefas
Lormes
Planvoy
Brassy

Carte 3.

Chinon. Toute la zone arénisée sur plusieurs mètres de hauteur est parcourue par un réseau richement doté en diaclases intimement anastomosées et comblées par un complexe argile-oxyde de fer de couleur très rouge, donant un contraste très accusé sur la teinte blanc grisâtre de l'arène. Cette migration extrêmement profonde, car on ne peut en saisir l'aboutissement — le socle n'étant pas visible — résulte sans doute de la dislocation d'un horizon B dispersé ainsi dans les fissures, du fait de l'ultra-perméabilité de l'arène. Nous rejoignons ici les constatations de L. BERTHOIS (1949) qui a décrit cette forme particulière de l'horizon illuvial sur l'arène granitique dans la région de Louvigne-du-Désert (Ille et Vilaine) et au nord de Brest.

Le profil AC ou A_0 A_1 C est donc la règle pour ces sols du Morvan Nord qui ressemblent en tous points à ceux décrits par D. COLLIER (1951) sur les plateaux granitiques du Massif Central, notamment dans le Puy-de-Dôme. Et tout dernièrement (juin 1957), Mme MERIAUX a publié cette même description pour un sol de St-Martin-de-la-Mer, localité située dans le Morvan de la Côte-d'Or.

Ce sont des sols essentiellement jeunes, peu évolués, de couleur grisâtre, doués d'un puissant pouvoir de rajeunissement par érosion, peu profonds, et assez variables en humus. Il semble qu'ils correspondent assez bien à la définition de RANKERS, non climatiques, à Mull, de KUBIENA et VON FRANZ (1953) ; on peut aussi les qualifier, lorsque leur évolution est un peu plus accentuée, de « sols bruns jeunes », affectés d'un lessivage latéral.

Répartition des prélèvements.

Ils ont été choisis surtout sur les territoires des communes de Lormes, St-Martin-du-Puy, St-André-en-Morvan. Leur répartition sur la carte pourra de prime abord apparaître irrationnelle, car des zones importantes n'ont pas été prospectées, alors que dans d'autres, les prélèvements sont très rapprochés. C'est qu'une grande superficie de cette région est occupée par la forêt (Bois de St-Martin, des Grands Vernets, des Graviers, des Marcioux, de Fadray, des Tours) que nous avons à dessein laissée de côté. Il ne subsiste qu'une place restreinte pour les sols de culture et les prairies, objectif de nos préoccupations, qui occupent en quelque sorte des clairières isolées, ce qui explique à la fois la localisation et la concentration des prises d'échantillons en des situations particulières.

Profondeur des sols.

Le tableau ci-après nous renseigne sur la profondeur des sols granitiques du Morvan Nord, facteur fondamental de la fertilité, comme l'ont prouvé les études de D. COLLIER et L. GACHON (1955) sur la région

N°	Position des prélèvements et coordonnées Lambert	Prof. du sol jusqu'à l'arène (cm)	Topographie	Culture pratiquée
1	Grand Pré 712,5 × 258,5.	50	Sol horizontal.	Prairie artif.
2	— (sol voisin).	28-30	Pente 8 à 10 %.	—
3	Grand Pré 712,7 × 258,3.	32	Pente presque nulle	—
4	Grand Pré 712,9 × 258,5.	30-32	Sol horizontal.	Cultures.
5	Grand Pré 713,25 × 258,8.	50	Horizontal.	Prairie.
6	Les Granges 713,3 × 259,3.	5-10	Horizontal.	—
7	Les Granges 713,8 × 259,75.	15	—	—
8	Rincieux 714,3 × 259,8.	18	Pente 10-12 %.	Cultures.
9	Saint-Martin-du-Puy 714,7 × 260,2.	18	Pente 10 %.	Cultures.
10	Saint-Martin 714,9 × 260,5.	15	Horizontal.	Prairie.
11	Saint-Martin 714,4 × 260,4.	20	—	—
12	(Sol voisin du n° 11).	22	—	Cultures.
13	Saint-Martin 714,4 × 260,5.	20	—	—
14	(Sol voisin du n° 13).	20	—	—
15	Lormes 712,5 × 259,5.	35	—	Prairie.
16	Lormes 712,4 × 259,3.	55-60	Légère pente.	Cultures.
17	Lormes 712,5 × 259.	20	Pente presque nulle	Prairie.
18	Lormes 712,7 × 258,8.	35	Pente 8-10 %.	Cultures.
19	Lormes 712,7 × 258,5.	30-32	Horizontal.	Cultures.
20	Lormes 712,5 × 258,6.	8	Horizontal.	Prairie.
21	(Sol voisin du n° 20).	30	Forte pente 20 %.	—
22	Richateau 710,9 × 256,2.	30	Horizontal.	Cultures.
23	Richateau 710,8 × 256,3.	60	—	Cultures.
38	Lormes 709,3 × 253,4.	15-18	Horizontal.	Prairie nat.
39	Brassy 716,8 × 252,1.	20	Subhoriz.	Forêt.
62	Lisière du Bois des Tours 710,6 × 253,7.	20	—	Prairie artif.
63	Près de l'Étang du Goulot 712,5 × 254,3.	15	—	Prairie et céréales.
64	Fraifontaine 713,4 × 254,2.	15-20	Très légère pente.	Céréales.
65	Brassy 717 × 254.	25	Horizontal.	Céréales.
66	Brassy 717,9 × 254,1.	10-12	Légère pente.	Cultures.
68	Fourlot 716,6 × 262,1.	20-25	Sol horizontal.	Prairie naturelle.
69	Montcrecon 718 × 261,7.	20-40	Pente accent.	Cultures.
70	Plainefas 717,4 × 257,7.	25	Légère pente.	Cultures.
71	Sonne 715,1 × 256,2.	35	Horizontal.	—
72	Sommée 714,4 × 253,2.	12-15	Très légère pente.	—
73	L'Huis Naulin 712,5 × 252,6.	15-20	Sol horizontal.	—
74	Planvoy 711,7 × 252,4.	12-15	—	—
75	Four à chaux 710,25 × 252,8.	15	—	—

de Lempdes en Limagne. En effet, plus un sol est profond, plus il est capable d'emmagasiner des réserves hydriques et nutritives qu'il pourra restituer aux végétaux en période de besoin, et plus il facilite l'installation d'un système radiculaire puissant, source de santé et de vigueur pour les plantes. Or, les 35 sols examinés se classent comme suit :

19 < 25 cm
12 : 25 à 35 cm
5 : 35 à 60 cm

Plus de la moitié ont donc moins de 25 cm de profondeur ; cette faible épaisseur caractérise les sols granitiques, et rend compte pour une part de leur médiocre fertilité.

Discussion des analyses physiques, tableau, ci-après.

La proportion de terre fine, seule utile aux végétaux — les cailloux et graviers > 2 mm n'intervenant pas dans l'alimentation des plantes —

varie, d'un prélèvement à l'autre, de 58 p. 100 à 94 p. 100 pour les extrêmes. Les 27 sols étudiés peuvent se classer ainsi :

	Terre fine $<$ 80 % —	17 sols (soit les 2/3)
80 % $<$	Terre fine $<$ 90 % —	8 sols
	Terre fine $>$ 90 % —	2 sols

Voici donc une seconde caractéristique qui n'est pas favorable aux rendements élevés.

La consultation des analyses des fractions inférieures à 2 mm montre — malgré leurs variations — une certaine parenté qui est le reflet fidèle de l'homogénéité du socle granitique et de ses zones d'altération. Dans tous les échantillons, les éléments grossiers l'emportent de beaucoup sur les éléments fins et le pourcentage des sables fins ne varie qu'entre d'étroites limites. Par contre, les teneurs en argile, facteur déterminant du complexe absorbant, oscillent entre 8,50 p. 100 pour la plus faible, et 22 p. 100 pour la plus élevée, avec toute une gamme de valeurs intermédiaires. Mais pour 18 sols, elle n'atteint pas 15 p. 100, d'où une forte perméabilité, avec comme corollaire une faible capacité de rétention.

Les sols les mieux constitués au point de vue physique se rencontrent dans la région de St-Martin-du-Puy (échantillons 13 et 15), et l'un des meilleurs (nº 68) est situé à Fourlot, non loin du contact granite-anatexite ; il possède une texture physique, assez voisine de ceux situés sur socle complexe anatexitique, réputés de meilleure qualité. Quant aux plus mauvaises textures, elles caractérisent les sols de Richateau, petit hameau à 1 km de Lormes (échantillons 22 et 23) où la somme des fractions fines : argile + limon ne représente que 18,8 p. 100 et 20, 40 p. 100 de la terre fine totale.

Moyenne des compositions physiques pour 27 sols

Terre fine	— 75,98
Argile	— 14,31
Limon	— 15,68
Sables fins	— 20,48
Sables grossiers	— 44,29
Mat. organiques	— 3,01

b) Étude minéralogique.

Cailloux et graviers.

Les observations notées à propos de l'étude du sol de Lormes sont valables dans le cas général. Les cailloux et graviers de taille fort diverse, sont constitués de fragments de granite altéré, d'associations de minéraux, surtout quartz-plagioclases, plagioclases-biotite, enfin de cristaux bien individualisés : quartz et microcline.

Les plagioclases, réduits en poussière dès ce stade, emplissent de minuscules géodes à l'intérieur du quartz, ou servent de ciment aux

Constitution physique. (*Prélèvements sur une tranche de sol comprise entre* 5 *et* 10 *cm*).

N° des échantillons	pH	% terre fine	Argile	Limon	Sables fins	Sables grossiers	H_2O^-	Matières organiques	Total
1	6,3	74,0	14,90	16,85	25,90	41,82	1,28	2,20	100,95
3	5,9	68,0	14,60	19,30	24,88	38,38	1,76	2,60	100,52
4	6,1	81,6	14,45	18,55	23,59	41,74	2,40	2,88	100,63
6	5,1	92,8	15,80	15,00	22,45	42,29	1,66	4,88	101,08
8	6,4	66,4	12,85	19,40	20,13	43,85	1,25	2,76	100,24
12	7,3	70,00	12,10	19,60	17,10	47,07	1,63	3,32	100,82
13	6,4	73,6	17,95	18,30	20,12	38,57	1,51	3,20	99,65
15	5,6	94,00	17,65	18,15	17,78	42,78	1,45	3,60	101,11
16	6,2	88,00	12,05	13,05	21,56	50,83	0,89	2,26	100,64
17	5,0	86,40	12,30	14,30	14,21	53,18	1,77	3,88	99,64
18	7,3	82,80	10,25	12,70	19,93	54,65	1,08	2,14	100,75
20	6,1	67,64	9,30	11,25	16,28	57,86	1,49	3,94	100,12
22	6,1	80,40	8,50	10,30	12,26	61,58	0,96	2,08	99,68
23	6,2	84,80	9,05	11,35	17,99	59,46	0,73	1,64	100,22
38	5,9	60,80	15,40	19,45	20,69	39,68	1,50	2,70	99,42
39	4,6	74,80	13,55	15,30	19,97	47,21	1,79	1,46	99,28
62	6,1	73,20	12,80	10,80	23,85	50,48	0,75	1,58	100,26
63	5,3	68,00	13,60	11,90	18,61	51,59	1,19	2,88	99,77
64	6,3	70,00	13,30	13,10	22,66	46,75	1,25	2,76	99,82
65	5,7	72,8	16,00	19,60	19,21	41,30	1,67	3,26	100,97
66	6,0	62,00	13,00	15,20	23,11	45,65	1,27	1,98	100,21
68	5,7	89,00	21,80	20,90	21,86	31,50	1,12	3,72	100,90
69	5,7	63,00	19,10	16,20	21,02	38,70	0,99	3,76	99,97
70	6,2	66,00	19,70	19,70	20,02	34,50	1,22	5,00	100,14
71	6,7	78,00	22,00	19,10	24,16	30,91	1,15	3,26	100,58
72	7,0	74,00	12,90	14,30	19,46	49,57	1,38	3,00	100,61
73	5,8	78,00	13,00	12,20	20,40	51,03	0,91	2,92	100,45
74	7,0	58,00	15,10	18,30	21,72	41,01	0,96	3,66	100,75
75	6,2	89,20	12,40	13,90	22,88	48,98	0,68	2,04	100,88

paillettes de biotite. L'état d'altération de ce minéral est extrêmement variable, mais beaucoup de cristaux sont mordorés à l'extérieur, alors que le centre garde encore une belle couleur noire. Les fragments de microcline peuvent atteindre 3 cm de long, toujours intacts. Par ordre d'importance décroissante, nous classerons quartz, microcline, plagioclases, et loin derrière la biotite. Absence de muscovite dans cette fraction grossière-

Sables grossiers.

L'ensemble des échantillons montre une individualisation à peu près complète des minéraux aux stades 1,25 mm-2 mm ou 800 μ-1,25. En plus de débris végétaux, les sables grossiers contiennent quartz et microcline en prédominance, plagioclases pulvérisés, une petite quantité de biotite et quelques assemblages tels que quartz-biotite, plagioclases-microcline. Le quartz est souvent hyalin, translucide, aux formes hétérogènes ; quelques rares cristaux aux faces émoussées s'observent dans la région de Fraifontaine (n° 64) ; ici nous sommes très proches de la grande carrière de Brassy, où les phénomènes de transport périglaciaires se révèlent dans toute leur ampleur et leur complexité. Près de Montcrecon (n° 69), les sables contiennent des cristaux de microcline aux belles formes cristallines. Quant à la biotite, elle est peu abondante, sauf toutefois à Plainefas et à Sonne (n° 70 et n° 71). Elle se caractérise par l'extrême variabilité de son faciès (depuis des cristaux aux faces parfaites jusqu'à des éléments déchiquetés) et de son état d'altération.

Nous avons décelé la présence de muscovite, en assez grandes lamelles dans deux échantillons : à Richâteau (n° 23) et Montcrecon (n° 69) ; son origine est certainement granulitique, les filons de cette nature recoupant le granite en de nombreux points. Richâteau, en particulier, se trouve à proximité d'un massif de granulite bien visible, au hameau de La Vallée distant d'un kilomètre environ.

Sables fins.

La proportion de la Biotite augmente dans tous les échantillons, car elle se concentre dans cette fraction ; c'est à Sonne (n° 71) que sa teneur paraît la plus abondante ; Microcline et Quartz diminuent, ce dernier étant très brillant, avec des cristaux aux formes variées, en aiguilles dans le prélèvement n° 69.

Argile.

Sa détermination minéralogique a été faite lors de l'étude de l'altération du granite, sur le sol de la carrière de l'Abattoir et elle a révélé la présence de kaolinite associée au quartz et à la gœthite. En matière de

fertilité des sols, l'examen qualitatif de l'argile a une importance aussi grande que sa détermination quantitative, car chacune d'elles possède des propriétés et une valeur agronomique très différentes. Or, les sols granitiques du Morvan-Nord sont dotés du plus mauvais matériel argileux ; en effet, la kaolinite est, parmi toutes les argiles, « la plus pauvre en cations capables de servir à l'alimentation des plantes » — ce sont les propres termes de FRANC de FERRIÈRE (1957)— les microfeuillets qui la constituent étant tellement serrés qu'il n'existe aucune place où ils pourraient se loger. De plus, sa capacité d'échange est la plus faible, vis-à-vis des éléments apportés par les engrais et nécessaires à une alimentation minérale correcte des végétaux. Autrement dit, les cations nutritifs, difficilement retenus, ne pourront être cédés à la disposition des récoltes au moment de leur pleine végétation où leurs besoins sont les plus impérieux.

Nature de l'argile	Capacité d'échange en milliéquivalents pour 100 g d'argile
Kaolinite	12
Illite	20 à 35
Montmorillonite	50 à 100
Vermiculite	120 à 140

c) Valeur chimique des sols granitiques.

Les résultats indiqués ci-dessous sont empruntés à un travail de M. SAJOT, en cours de publication.

Moyenne des pH : 6,1.

Éléments fertilisants	Moyenne	
N_2 %	1,47	Min. : 0,82 (n°23, à Richateau). Max. : 2,44 (n° 6, Les Granges).
P_2O_5 assimilable %	0,16	Min. : 0,02 (n° 17, Lormes). Max. : 0,99 (n° 18, Lormes).
K_2O échangeable %	0,17	Min. : 0,07 (n° 20, Lormes). Max. : 0,48 (n° 3, Grand Pré).
P_2O_5 total %	1,91	Min. : 0,71 (n° 595, Abattoir Lormes). Max. : 4,44 (n° 6, Les Granges).
K_2O total %	22,5	Min. : 8,07 (n° 20, Richateau). Max. : 35,75 (n° 13, Saint-Martin).
$\frac{P_2O_5 \text{ assimilable}}{P_2O_5 \text{ total}}$ %	8,37	Min. : 1,2 (n° 17, Lormes). Max. : 34 (n° 18, Lormes).
$\frac{K_2O \text{ échangeable}}{K_2O \text{ total}}$ %	0,75	Min. : 0,36 (n° 22, Richateau). Max. : 4,66 (n° 18, Lormes).

Les sols granitiques, assez bien pourvus en N_2, ont donc des teneurs en P_2O_5 assimilable et K_2O échangeable relativement faibles. Nous savons, en effet, que la scission de K_2O contenu dans le microcline, de loin le plus important dans ces sols, est très réduite, et que l'origine de

la fraction échangeable est tirée de la biotite qui est ici un élément mineur. Si les praticiens sont unanimes à prôner la nécessité d'apports de P_2O_5 dans la région, par contre les opinions ne concordent pas en ce qui concerne K_2O ; certains pensent que le stock en réserve dans le sol suffit pour une nutrition normale des cultures et que l'application des engrais potassiques ne s'impose pas avec la même acuité. Ces quelques observations suffisent à prouver l'inexactitude d'une telle affirmation ; d'ailleurs la réponse de la plante à cette fumure est la preuve la plus tangible du bien-fondé de son application.

Conclusion

Nous pouvons donc résumer comme suit les caractéristiques des sols granitiques de la région de Lormes : faible profondeur, perméabilité élevée, éléments grossiers dominant dans la composition physique, mauvaise qualité de leur argile, valeur chimique médiocre, tout autant de facteurs qui se conjuguent pour restreindre les possibilités de rendements importants.

II. — LES SOLS SUR COMPLEXE ANATÉXITE-GRANITE-GRANULITE

L'étude des sols reposant sur Anatéxite à Cordiérite depuis Empury jusqu'à Chastellux, est beaucoup plus délicate que celle sur granite, car ce massif est en effet truffé de nombreux systèmes de filons généralement orientés sud-ouest-nord-est, de nature et d'importance très variées, mais tellement denses et s'agençant en un réseau si serré, que leur cartographie n'est pas œuvre facile. La carte géologique d'Avallon en représente un certain nombre (surtout granulite et rhyolites passant au microgranite) ; A. Cochet (1953) s'est penché aussi sur ce problème, mais c'est au service géologique de la Division de Grury du Commissariat à l'Énergie Atomique que revient dernièrement le mérite d'avoir fouillé de très près la région et de préciser les arcanes de ce véritable champ filonien.

L'examen de la carrière de Berges, à 3 km au nord de St-Martin-du-Puy, fournit un bon exemple de la structure de ce socle et donne une idée de son extrême complication qui va se refléter sur les sols qui en dérivent.

A. — Les faciès de Berges.

1° Contact Anatexite à Cordiérite et Granite de Lormes — Échantillon n° 92.

Ce contact est facilement observable, vers le milieu de la carrière, où il s'établit suivant une ligne très franche.

Au microscope — L. M. 7016 — on passe rapidement de la structure grenue du granite à la structure grano-lépidoblastique de l'anatexite. Aux grands porphyroblastes de microcline du granite, dont les fissures sont comblées par de la biotite chloritisée et de la limonite, succèdent les alignements de biotite de l'anatexite, dont les cristaux sont effilochés sur les bords et contiennent de nombreuses inclusions d'apatite. Au contact, il y a une intense chloritisation.

2° Granite à reflets roses, différent du faciès de Lormes — Échantillons 90-91. L. M. 7014 et 7015.

On peut récolter un granite filonien recoupant les anatexites, ressemblant à celui de Lormes, mais qui s'en distingue aisément par son faciès à reflets roses, par sa proportion plus élevée en biotite (la roche peut même être enrichie localement), et sa plus grande résistance à l'altération.

La structure est typiquement grenue, moins porphyroïde qu'à Lormes. Le quartz est abondant et certains cristaux dessinent un véritable puzzle, s'engrenant fortement les uns dans les autres. Certaines plages ont des extinctions roulantes ; d'autres sont parcourues de fissures fines où peuvent s'accumuler des produits opaques ou même des paillettes de biotite.

Les plagioclases (Albite) dont les cristaux sont nombreux, montrent tantôt de fins clivages, tantôt des plages zonées, et tantôt une séricitisation plus ou moins avancée. La séricite ne se cantonne pas sur les lignes de clivage, mais peut s'installer sur le reste du cristal, accélérant ainsi l'altération du feldspath.

Le microcline anorthose ($2\ V = -58°$) est moins abondant que les plagioclases et peut former au contact du quartz une association pegmatitique.

La biotite est abondante, en plages très polychroïques, d'une belle couleur brune, très riches en auréoles pléochroïques ; l'une d'elles recouvre presque tout le cristal, et est représentée par du Zircon. Les plagioclases repoussent la biotite et ont provoqué localement des effets de friction marqués par un effritement des cristaux.

L'apatite développe de splendides plages hexagonales au sein de la biotite.

A noter la présence de rares cristaux de muscovite, traduisant probablement un excès d'Al dans la roche.

Le mode de gisement de ce granite, de type chonolitique, peut se rapprocher de celui de Cornil, en Corrèze, décrit par M. Roques (1941).

3° Contact de ce granite à reflets roses avec un granite aplitique. — Échantillon 93 L. M. 7017.

Il s'agit d'un filon de granite à grain fin, très blanc, dont les cristaux sont très brillants, et qui se caractérise par une très petite teneur en phyllites.

Les quartz xenomorphes sont fortement imbriqués les uns dans les autres. Bien que la roche soit très saine et très résistante au choc du marteau, les plagioclases peuvent avoir conservé leurs clivages, ou au contraire être envahis de séricite. Le microcline développe des plages plus étendues que celles des plagioclases. Quant à la biotite et à la muscovite, leur proportion est infime. Présence d'apatite en beaux cristaux hexagonaux.

4° Aplite différente du granite aplitique. Échantillon 89 L. M. 7013.

La carrière recèle encore un filon d'aplite très dur dont le grain plus fin le distingue du granite aplitique qui vient d'être décrit. Le quartz présente une allure identique, avec de fortes indentations. Les plagioclases, représentés par une albite à la limite de l'oligoclase, montrent toujours la même variabilité de leur état d'altération et certaines plages sont affectées de fractures perpendiculaires aux lignes de clivage, remplies de produits opaques. La biotite, peu ou pas chloritisée est rare ; quelques plages de muscovite assez déchiquetées. Le microcline anorthose est moins abondant que les feldspaths calco-sodiques. Présence d'apatite.

5° Calcite.

De très grandes diaclases — deux d'entre elles notamment, d'ailleurs parallèles, ont une dizaine de mètres de long et quelques centimètres de large — sillonnent la carrière et sont tapissées de magnifiques cristaux de calcite, témoignage de la puissante activité chimique dont ce socle est le siège.

Ainsi le gisement de Berges illustre bien la complexité de cette zone du Morvan-Nord, au contact du système Granite de Lormes-Anatexite. Mais cette hétérogénéité est aussi la règle à l'intérieur du substratum anatexitique, où l'on trouve encore Granulite — digitations du massif de la Pierre-qui-Vire, Rhyolites et Microgranites. Par contre, le granite de Lormes ne pénètre pas au sein du gisement cristallophyllien.

Le développement filonien est tel dans les anatexites de la zone Empury-Chastellux que les affleurements de la roche pure sont limités à une surface plus réduite que ne l'indique la feuille d'Avallon ; par voie de conséquence, les sols d'origine uniquement cristallophyllienne voient

leur importance se restreindre, et à cet égard il convient de noter de suite une observation valable pour toute la région : ils sont presque exclusivement le domaine de la forêt — phénomène tout à fait identique dans la région de Neuvic d'Ussel, en Corrèze, constituée également d'anatexite à cordiérite — alors que les terres de culture et les prairies reposent sur un mélange pétrographique extraordinaire que nous avons dénommé : complexe anatexite-granite-granulite.

B. — Étude physique des Sols sur Complexe.

Profil.

Il est en tous points identique à celui sur granite, ce qui établit une analogie avec les sols déjà décrits. De bonnes observations peuvent être effectuées sous forêt, à Chastellux, à Moulin-de-Main, et sur la route d'Athée à St-André-en-Morvan. Pas d'horizon B décelable, l'horizon A_1 reposant directement sur le gore anatexitique C_0.

N°	Position des prélèvements et coordonnées Lambert	Prof. du sol jusqu'à l'aréne (cm)	Topographie	Culture pratiquée
24	Côte 368 713,6 × 263,7	12	Sol horizontal.	Plantes sarcl.
25	1 km au N. de Breugny 713,7 × 263,6.	> 50	—	Prairie artif.
26	1 km au S. d'Athée 713,8 × 264,1.	50	—	Plantes sarcl.
27	— (Sol voisin) 713,8 × 264,2.	> 50	—	Prairie nat.
28	Athée 713,9 × 264,5.	> 50	Très légère pente.	Céréales.
29	Breugny 713,5 × 263,3.	> 50	Subhorizont.	Céréales et pl. sarcl.
30	Breugny (sous sol à 30 cm).	—	—	—
31	Breugny 713,5 × 263,2.	> 50	—	Prairie nat.
32	Breugny 714 × 262,8.	> 40	—	Céréales
33	(Sous sol à 30 cm).		—	et prairie artif.
34	Breugny 714,1 × 262,7.	17	—	Céréales.
35	Breugny 713,4 × 262,3.	40	Horizontal.	Prairie nat.
36	Moulin de Main 711 × 262,3.	25-30	Pente assez forte.	Forêt.
37	Empury 712,6 × 261,5.	60-65	Horizontal.	Prairie artif.
40	Chastellux 716,7 × 267,75.	30-35	—	Forêt.
41	Chastellux 716,7 × 268	40-45	—	Céréales.
42	(Sol voisin).	60-65	—	Céréales.
3	Chastellux 716,9 × 267,8.	40-50	Légère pente.	Prairie nat.
44	Chastellux 716,6 × 267,9.	80	Horizontal.	Cultures.
45	Les Meulots 714,8 × 266.	50-60	—	Plantes sarcl.
46	Empury 715,6 × 261,9	25-30	—	Prarie nat.
47	Empury 713 × 261,7.	> 50	Trè légère pente.	Prairie nat.
48	Breugny 713,7 × 262,7.	25-30	Subhorizont.	Prairie temp.
49	Berges 714,7 × 262,8.	30	Pente 8-10 %.	Plantes sarcl.
50	Breugny 713,7 × 263,9.	50	Horizontal.	Prairie art.
51	(Sol voisin).	> 50	—	Céréales.
52	Athée 714,3 × 265,2.	> 50	—	Forêt.
53	Athée 714,4 × 265,4.	45	Subhorizont.	Forêt.
54	L'Huis Jacot 714,7 × 265,6.	40	Horizontal.	Forêt.
55	Saint-André 714,4 × 266,2.	> 50	—	Céréales.
56	Saint-André (sol voisin).	20	Horizontal.	Forêt.
57	Moulin de Main.	> 50	Subhorizont.	Forêt.
58	Moulin de Main 710,5 × 262,5.	50	Subhoriz.	Forêt.
59	— 710,5 × 262,7.	35	—	Forêt.
60	— 710,8 × 262,5.	> 50	Horizontal.	Prairie nat.
61	Empury 711,6 × 262,5.	50	Pente légère.	—
67	Vézigneux 715,75 × 262,8,	20-45	Horizontal.	Céréales et pl. sarcl.
791	Saint-Brancher 725,5 × 275,5.	25	Pente légère.	Forêt.

Répartition des prélèvements.

Les échantillons ont été surtout prélevés dans la région d'Empury (hameaux de Breugny-Athée) et de St-André-en-Morvan, voulant à dessein nous cantonner aux sols nivernais, ou proches des limites du département ; c'est aussi la zone où la proportion des cultures est la plus élevée.

Profondeur des sols sur complexe.

Le tableau précédent nous conduit à classer comme suit les 36 sols examinés :

3 < 25 cm.
7 : 25 à 35 cm.
11 : 35 à 50 cm.
15 > 50 cm.

Cette propriété des sols sur complexe de posséder une profondeur moyenne plus élevée les différencie très nettement des sols granitiques et constitue peut-être l'un des arguments les plus sûrs pour expliquer leur meilleure fertilité.

Constitution physique.

Prélèvements effectués dans les mêmes conditions que dans le cas des sols granitiques.

Nous distinguerons deux catégories de sols :

a) Ceux établis sur anatexite pure, presque toujours occupés par la forêt.

b) Les autres, sur complexe granite-granulite-anatexite, tous occupés par les cultures et les prairies.

Remarques sur les sols cristallophylliens.

Les sols sur anatexite pure, dont le pH très bas est la règle commune, possèdent des constitutions physiques variant avec la situation géographique. Les échantillons de Moulin-de-Main, relativement homogènes (nº 36, 56, 57) sont les plus riches en argile et en limon où leur total peut atteindre 45 p. 100, et les plus pauvres en sables grossiers (22,56 p. 100 pour le nº 57). Par contre, dans la région d'Athee et de Chastellux, (nº 41, 42, 52, 53) les fractions fines diminuent d'importance, au profit des sables grossiers dont la teneur n'oscille qu'entre des limites relativement serrées (de 40,4 à 44 p. 100). Il ne semble pas cependant que les meilleures textures physiques de la partie méridionale du massif anatexitique se traduisent par un développement plus puissant du manteau forestier dans cette région, la vitalité de celui-ci étant partout sensiblement identique.

a) *Sols sur anatexite pure.*

N° des échantillons	pH	% terre fine < 2 mm	Argile	Limon	Sables fins	Sables grossiers	H_2O^-	Matières organiques	Total
36	4,5	70.0	19,30	17,50	20,45	28,88	6,46	7,22	99,81
40	4,5	87,5	16,25	16,55	26,52	37,95	1,01	2,36	100,64
41	5,5	83,0	16,55	15,85	23,00	40,68	1,58	2,98	100,64
42	6,1	86,0	12,25	15,40	28,83	40,41	0,83	2,76	100,18
52	4,9	77,2	16,00	18,20	18,42	43,00	1,99	3,16	100,77
53	4,8	89,2	13,20	15,40	21,70	44,12	1,76	2,60	98,78
54	5,3	73,4	13,60	17,40	20,90	44,07	1,14	2,26	99,37
56	5,0	76,0	17,20	14,10	22,56	40,80	1,68	3,10	99,44
57	5,3	92,0	21,00	24,50	25,90	22,56	2,62	3,54	100,12
58	4,9	92,0	21,80	21,90	23,68	26,08	2,46	3,94	99,86
59	5,1	82,8	17,80	16,90	24,92	37,81	1,72	1,80	100,95
791	5,4	76,4	18,80	19,40	26,72	31,89	1,56	2,82	101,19

Moyenne pour 12 sols :
pH : 5,1. — Terre fine : 82,12. — Matières organiques : 3,21. — Argile : 17, 20. — Limon : 17, 76. — Sables fins : 23,80. — Sables grossiers : 35,68.

Les sols sur complexe ont un pH moyen nettement plus élevé = 5,88 au lieu de 5,1, et une proportion en terre fine également plus grande. Quant à leurs textures physiques, elles montrent des variations d'une notable amplitude suivant les prélèvements, en relation directe avec la plus ou moins grande complexité minéralogique. Nous trouvons des sols dont la constitution physique ne se différencie pas de celles des meilleurs échantillons sur anatexite pure (Ex : nº 31, 45, 50, 61) et d'autres qui rappellent la texture des sols granitiques (nº 24, 47, 67), les deux derniers prélèvements se situant d'ailleurs dans une zone de transition en bordure du contact Granite de Lormes-Anatexite.

Différences avec les sols granitiques.

Le calcul des moyennes des constituants physiques des sols reposant sur anatexite pure ou sur complexe nous permet de mettre en lumière de nouvelles différences avec les sols granitiques.

En ce qui concerne le pourcentage de terre fine, qui seule assure le développement des végétaux, nous trouvons 82,12 p. 100 pour les sols anatexitiques, 86,20 p. 100 pour les sols sur complexe, soit respectivement 7,14 p. 100 et 10,22 p. 100 de plus que la moyenne des sols granitiques.

D'autre part, la répartition des diverses fractions est mieux équilibrée dans les sols cristallophylliens ; ils sont légèrement plus riches en éléments fins, mais surtout contiennent 8,61 p. 100 et 8,09 p. 100 de moins de sables grossiers. Ces deux caractéristiques plaident encore en faveur d'une meilleure productivité, et interviennent en mettant, d'une part, à la disposition des plantes un plus grand volume de sol utilisable et, d'autre part, en leur assurant un meilleur bilan hydrique, les fractions fines venant ralentir la vitesse d'infiltration de l'eau de gravité.

C. Étude minéralogique.

L'examen minéralogique des sols sur complexe est sans conteste la partie la plus longue et la plus difficile de cette étude, eu égard à l'extrême hétérogénéité du massif cristallophyllien. Mais c'est peut-être aussi la plus captivante, la contribution de cette discipline s'avérant en la circonstance tellement fondamentale, que la seule détermination pétrographique des constituants peut renseigner ici sur la qualité des sols.

Cette composition minéralogique évolue entre deux pôles distincts : depuis des sols uniquement anatexitiques où l'on ne rencontre que des fragments ou des minéraux de cette roche, jusqu'à des sols aux constituants essentiellement granitiques, en passant par une gamme intermédiaire très variée qui peut atteindre une remarquable complexité.

b) *Sols sur complexe.*

N° des échantillons	pH	% terre fine	Argile	Limon	Sables fins	Sables grossiers	H_2O^-	Matières organiques	Total
24	5,8	71,0	13,90	14,15	19,78	46,14	2,50	4,10	100,57
25	6,0	85,0	18,0	19,70	25,79	32,06	2,00	2,42	99,97
26	5,6	93,0	14,55	19,00	26,11	34,19	2,11	2,98	100,94
27	5,5	94,0	13,50	16,95	24,09	39,64	2,34	4,22	100,74
28	5,6	89,5	14,00	17,45	26,46	37,84	2,15	2,76	100,66
29	7,2	86,0	15,70	19,05	30,99	30,78	1,95	2,20	100,67
30	6,8	81,5	15,60	20,45	29,63	31,42	1,97	1,98	101,05
31	5,8	95,0	18,85	18,80	26,90	27,87	3,11	4,56	100,09
32	5,7	86,0	15,05	17,40	19,86	43,04	1,85	3,72	100,92
33	5,4	88,0	15,60	17,30	20,94	40,95	1,95	3,10	99,84
34	5,9	96,0	15,80	17,70	24,60	36,94	2,12	2,88	100,09
35	5,5	76,0	17,45	16,30	20,51	38,68	3,00	4,50	100,44
37	7,2	79,4	16,10	18,90	24,48	36,57	2,14	2,82	101,01
43	5,5	89,5	13,75	16,65	24,20	40,92	1,07	2,88	99,67
44	5,9	83,0	17,00	15,35	30,22	33,47	1,51	3,20	100,77
45	5,8	91,5	18,55	19,45	25,13	32,35	1,30	2,98	99,76
46	5,2	80,0	15,45	17,10	22,32	39,18	1,16	3,72	100,79
47	6,0	82,0	13,90	15,70	20,78	46,56	1,43	2,26	100,63
48	6,8	76,8	16,40	16,30	23,74	36,25	2,31	5,90	100,90
49	5,7	75,2	14,00	18,40	24,30	38,53	1,46	3,32	100,01
50	5,7	92,0	17,20	20,90	33,10	25,14	1,61	2,82	100,77
51	6,1	90,8	14,00	24,90	27,09	30,22	1,50	3,20	100,91
55	5,4	91,2	14,00	17,60	26,26	37,15	1,30	2,60	98,91
60	5,3	92,0	17,90	20,40	22,77	33,62	1,90	4,30	100,97
61	5,8	92,8	17,00	26,00	23,05	26,25	1,98	3,48	99,06
67	6,2	81,0	15,50	12,90	24,96	44,96	0,58	2,06	100,96

Moyenne pour 24 sols :
pH : 5,88. — Terre fine : 86,20. — Matières organiques : 3,54. — Argile : 15,75. — Limon : 18,13. — Sables fins : 24,68. — Sables grossiers : 36,17.

Cailloux et Graviers.

C'est la fraction sur laquelle les observations pétrographiques sont les plus fructueuses, les fragments de roches étant suffisamment importants pour pouvoir en noter l'origine sans ambiguïté, alors qu'il est quelquefois moins aisé de la préciser sur des associations de minéraux de roches-mères très variées dans les fractions de moindre diamètre et à fortiori sur des minéraux isolés.

I. — Cas des sols sur anatexites pures.

Les cailloux et graviers sont représentés ici par des fragments d'anatexite de grandeur variable, et dont les faciès ne sont pas partout identiques, ce qui confirme leur hétérogénéité signalée à propos de leur altération. Les sols de la région d'Athee, Chastellux (Ex. nº 52-53-54), contiennent des faciès nébulitiques, alors que le type embréchitique se retrouve à St-Brancher (nº 791).

Parfois aussi, comme à Moulin-de-Main (nº 69), on récolte des morceaux d'une anatexite très noire (forme mélanocrate) qui peuvent être confondus avec des cornéennes de même couleur, fortement enrichies en biotite, également présentes dans certains échantillons (nº 57). Ces fragments de roches où la schistosité cristallophyllienne est conservée, mais parfois estompée (sol nº 56 de St-André), ont plus ou moins résisté aux coups des agents de l'érosion ; en général, ils possèdent sur leur bordure une zone très altérée, formant patine, au-delà de laquelle les effets de dégradation ne se font guère sentir ; au contraire, d'autres échantillons sont attaqués dans l'ensemble de leur masse, comme à Athee (nº 52) et à St-André-en-Morvan (nº 55) ; on distingue alors surtout les alignements micacés où chaque cristal de biotite affecte un aspect bien particulier, les quartz et microcline intacts, et un amas jaunâtre de matériel finement pulvérisé constitué de plagioclases associés probablement à la cordiérite.

A côté de ces éléments, les cailloux et graviers contiennent encore des cristaux de quartz isolés, des associations : quartz-biotite, quartz-muscovite, cette dernière remarquablement résistante dans tous les cas, enfin des édifices fragiles : quartz + phyllites où la poussière de plagioclases joue le rôle de liant.

II. — Cas des sols sur complexe.

L'examen des cailloux et graviers est ici capital car il conduit à l'établissement d'une classification de ces sols, basée sur une parenté plus ou moins éloignée avec les types exclusivement anatexitiques.

1° Sols proches parents des sols anatexitiques ou l'apport filonien est réduit :

n° 29 — Breugny.

n° 44 — Chastellux.

n° 60-61 — Moulin-de-Main.

2° Sols aux caractères pétrographiques plus complexes mais ou l'anatexite est dominante :

n° 32-34-35 — Breugny.

3° Sols de composition minéralogique très complexe ou l'apport filonien l'emporte sur les anatexites :

n° 48-50-51 — Breugny-Empury.

n° 49 — Berges.

4° Sols ayant des affinités avec les types granitiques :

n° 24-25 — Breugny.

n° 26-27-28 — Athée.

5° Sols proches parents des types granitiques ou la fraction anatexitique est peu abondante :

n° 37-47 — Breugny.

n° 43 — Chastellux.

n° 67 — Vezigneux.

Nous allons examiner la composition pétrographique de certains échantillons tout à fait remarquables par leur complexité.

Sol n° 48 — *Breugny* : On rencontre dans le même champ des blocs d'anatexite, riches en biotite, dont les lamelles signalent nettement la schistosité cristallophyllienne, d'autres où l'on aperçoit le contact anatexite-granite à reflet rose différent du type de Lormes, fortement doté en biotite, des fragments de ce même granite avec des accumulations locales de mica, de couleur noir brillant, des fragments arrachés à un filon de quartz saccharoïde, à grain fin, et parcourus de quelques mouchetures de biotite plus ou moins mordorée.

A ceci s'ajoutent des corpuscules de quartz et microcline isolés, et les assemblages classiques quartz-plagioclases argilisés-phyllites.

Sol n° 49 — *Berges* : Ce sol est à proximité de la route Breugny-Berges et présente des caractères très voisins du précédent. On peut relever dans l'inventaire pétrographique des anatexites à cordiérite, dans un état avancé d'altération, et aux remarquables lits de biotite, des granites à grain moyen, des granites aplitiques avec une légère orientation des phyllites, plus abondantes d'ailleurs que le faciès de la carrière de Berges, des cornéennes assez rares, très noires, où brille la biotite.

Dans les graviers, grande abondance de quartz, dont les faces sont parfois un peu émoussées.

Sol n° 50 — *Breugny* : A côté des anatexites dont un échantillon assez hybride ressemble à un granite d'anatexite, le cortège filonien comporte :

— Granite aplitique (sans trace de muscovite).

— Granite à reflet rose, très altéré, se réduisant en arène sous la simple pression de la main.

— Granite d'un type différent des deux prédécents, inconnu à Berges, avec toujours quartz, feldspaths et biotite, mais à grain de grosseur intermédiaire, résistant à l'altération, ce qui corrobore le mode de gisement chonolitique de cette roche.

Sol n° 51 — *Breugny* : Anatexite de type mélanocrate.

— Granite aplitique sans trace d'altération.

— Granite à reflet rose.

— Rhomboèdres de calcite aux faces parfaites, colorées parfois par l'oxyde de fer.

De façon générale, ces types de sols se révèlent les plus productifs, alors que si l'un s'éloigne vers le pôle anatexitique ou granitique, la fertilité décroît.

Les sols à affinité granitique se repèrent aisément sur le terrain, par exemple à Breugny (n° 24 et 25) par la diminution très accusée des fragments d'anatexite, alors que les éléments granitiques prennent de plus en plus de prépondérance. Toutefois, la proportion de biotite est plus abondante que dans les sols granitiques.

Les sols proches parents des types granitiques purs ne contiennent souvent pas de graviers anatexitiques et peuvent se rencontrer aussi bien en bordure du socle cristallophyllien (n° 67 Vezigneux), qu'au sein même de ce massif (n° 43, Chastellux).

Sol n° 37 — *Breugny* : L'examen des cailloux montre la présence de fragments d'un granite de la grosseur d'un œuf, non porphyroïde, identique au faciès de Berges, avec son quartz brillant, ses feldspaths calco-sodiques pulvérisés et sa biotite en plages allongées. Il n'y a pas ici trace d'anatexite.

Sol n° 47 — *Empury* : Composition minéralogique presque identique à celle qui vient d'être décrite, à laquelle s'ajoutent des éléments de quartz saccharoïde, très brillant, ponctués de fines lamelles de biotite ou de limonite.

Sol n° 67 — *Vezigneux* : Granite rose. Quartz très abondant, pouvant atteindre une grande taille. Anatexite assez rare.

Ces quelques descriptions suffisent à prouver l'immense hétérogénéité pétrographique des sols de la région imputable au développement filonien d'une ampleur ici exceptionnelle, et qui leur confère une physionomie toute spéciale. Cette hétérogénéité se manifeste sur un espace restreint surgissant presque à chaque pas, à telle enseigne que le hameau

de Breugny compte presque tous les types dans un rayon de 2 km au maximum. Aussi bien, eu égard aux difficultés d'étude qui tiennent à cette variabilité des faciès, avons-nous jugé préférable de ne pas disperser les efforts sur une trop grande surface, où l'on risque dès lors d'être débordé par l'étendue des problèmes à résoudre.

Sables grossiers.

L'étude à la loupe binoculaire des sables grossiers se révèle encore très fructueuse, car elle permet d'inventorier d'une manière assez satisfaisante les types de sols de cette partie du Morvan-Nord et de confirmer les conclusions tirées de l'examen des cailloux et graviers.

I. — Sols sur anatexite pure.

Les sables grossiers offrent un aspect complètement différent de celui des sables granitiques de la région de Lormes ; ils se caractérisent par la plus petite dimension de la taille des cristaux — ce qui explique l'emprise moins incisive de l'altération sur le substratum cristallophyllien —, l'abondance de la biotite, souvent chloritisée, mordorée, en association avec la pinite de couleur jaunâtre, la présence de muscovite dont la proportion est bien moindre que celle de la biotite, enfin la diminution du microcline, élément majeur des types granitiques.

De plus, les cristaux de quartz et de microcline des sables anatexitiques sont aplatis du fait de la schistosité.

Citons parmi les échantillons intéressants du point de vue minéralogique, les sables de Chastellux (n° 42), contenant de splendides cristaux de biotite où l'un d'eux est formé de l'empilement de 3 séries d'hexagones pg1, et ceux de l'Huis Jacot (n° 54) avec ses grains de quartz enfumé, aux faces émoussées.

II. — Sols sur complexe.

Les caractères de leurs sables grossiers peuvent se résumer comme suit :

1° Dimension variable de leurs minéraux, les plus grands ayant une origine généralement éruptive.

2° Grande variation de l'allure des cristaux de quartz dont une proportion importante est déjà individualisée, toujours très abondant, translucide, ou au contraire parcouru de traînées limoniteuses ; mais à côté de cristaux de forme hétérogène, d'appartenance éruptive, d'autres sont aplatis sur les deux faces, car issus des processus métamorphiques. Cette observation est facile dans l'échantillon n° 50 du complexe et dans les prélèvements n° 24, 25, 26, 27, ce qui nous a incité à classer ces der-

niers dans les types à affinité granitique, avec une parenté par ailleurs plus ou moins étroite.

3° Plus grande teneur en biotite que dans les sables granitiques.

4° Prédominance des plagioclases sur les microclines.

5° Présence d'associations biotite-plagioclases-cordiérite, ce dernier minéral disparaissant dans les sols voisins des types granitiques (n° 37, 47, 67).

Nous avons pu vérifier les remarques de P. Birot sur l'altération de la biotite dans deux échantillons très typiques : n° 29, Breugny et n° 37, Empury. On voit les différentes lamelles qui ont perdu de leur éclat, se cliver, et s'écarter progressivement les unes des autres, laissant entre elles des vides importants pouvant être occupés par l'eau qui, dès lors, accélèrera le travail de destruction. Plusieurs plages de ce minéral sont déjà sillonnées de minuscules diaclases superficielles, merveilleux canalicules pour les solutions responsables de la désagrégation physico-chimique.

Sables fins.

Les sables fins ne permettent plus d'identifier les différents types de sols anatexitiques ou granitiques. D'ailleurs, la détermination minéralogique des particules en deça de 80μ est presque impossible à l'aide de la simple loupe. On note simplement la grande abondance du quartz, de forme très irrégulière, cristaux brillants, translucides en raison de leur faible épaisseur, une poudre de plagioclases de teinte plus ou moins vert jaunâtre suivant la teneur en cordiérite, et les nombreuses plages de biotite, beaucoup plus denses que dans les sables grossiers, bien reconnaissables grâce à leur altération avancée.

Ici, peu de microcline, et teneur variable en muscovite.

Argile.

L'identification du type minéralogique des argiles cristallophylliennes a été envisagée dans les pages antérieures : les échantillons d'Empury, Chastellux et St-Brancher, contiennent tous une association de deux minéraux argileux : kaolinite et illite, cette dernière représentant au moins 55 p. 100 du mélange, avec comme complément quartz et gœthite, comme dans les argiles des sols granitiques. Détermination riche en renseignements agronomiques, les propriétés de l'illite étant bien différentes de celles de la kaolinite. En effet, contrairement à cette dernière, ses microfeuillets ont la possibilité de s'ouvrir, et les espaces vides peuvent être comblés par des cations nutritifs, surtout K_2O, mis à la disposition des végétaux par les engrais. Aussi ne faut-il pas s'étonner de constater des teneurs en K_2O supérieures à celles des argiles kaolinitiques

(2,70 p. 100 à Chastellux, 1,30 p. 100 à Empury au lieu de 0,80 p. 100 à Lormes). De plus, la capacité d'échange de l'illite est au moins deux fois supérieure à celle de la kaolinite. Dès lors, on ne peut que souscrire à l'opinion de FRANC DE FERRIÈRE (1957) suivant laquelle « l'Illite est la plus utile pour assurer à la fois la rétention de la potasse apportée par les engrais et la nutrition minérale en potasse des plantes de culture ». Nouvel argument et non des moins constructifs dans la recherche des causes de la meilleure fertilité des sols sur complexe.

D. — Valeur chimique des sols cristallophylliens.

Tout comme pour les sols granitiques, M. SAJOT (1) nous a communiqué très aimablement les résultats de ses analyses concernant la valeur chimique des types cristallophylliens.

1. — *Sols de forêts (Anatexite pure).*

Éléments fertilisants	Moyenne	Valeurs extrêmes
N_2 ‰	1,60	Min. : 0,90 (n° 59). Max. : 3,61 (n° 36).
P_2O_5 assimilable ‰	0,03	Min. : 0,01 (n° 53). Max. : 0,04 (n° 57).
K_2O échangeable ‰	0,18	Min. : 0,08 (n° 52). Max. : 0,30 (n° 57).

2. — *Sols cultivés sur complexe.*

Éléments fertilisants	Moyenne	Valeurs extrêmes
N_2 %	1,77	Min. : 1,03 (n° 67). Max. : 2,95 (n° 48).
P_2O_5 assimilable %	0,11	Min. : 0,03 (n° 28). Max. : 0,49 (n° 48).
K_2O échangeable %	0,21	Min. : 0,08 (n° 25). Max. : 0,75 (n° 27).
P_2O_5 total %	1,65	Min. : 0,94 (n° 59). Max. : 2,43 (n° 48).
K_2O totale %	20,71	Min. : 12,67 (n° 49). Max. : 24,80 (n° 27).
$\frac{P_2O_5 \text{ assimilable}}{P_2O_5 \text{ total}}$ %	6,66	Min. : 1,50 (n° 28). Max. : 20,1 (n° 48).
$\frac{K_2O \text{ échangeable}}{KO_2 \text{ totale}}$ %	1,01	Min. : 0,3 (n° 25). Max. : 3 (n° 27).

Les sols de forêts, normalement pourvus en N_2, se caractérisent par une teneur exceptionnellement faible en P_2O_5 assimilable et un taux de K_2O échangeable identique à celui des sols granitiques.

En ce qui concerne P_2O_5, dont la quantité totale approche celle des sols cultivés, il semble que deux mécanismes de rétrogradation entrent

(1) M. SAJOT : Note en préparation sur la valeur chimique des sols du Morvan-Nord.

en jeu pour combiner leurs effets de fixation. D'une part, le milieu étant très acide (pH moyen = 5,1), l'acide phosphorique s'unit au fer, très abondant dans ces anatexites et leurs produits d'altération, suivant une réaction irréversible ; d'autre part, ces composés sont fortement retenus par l'argile, d'où il est très difficile de les dissocier pour être remis en solution. Le fait est particulièrement saisissant à Moulin-de-Main où la fraction argile concentre la plus forte teneur en P_2O_5 = 0,48 p. 100 des 4 constituants < 2 mm. Comment une quantité aussi infime d'acide phosphorique peut-elle, dès lors, subvenir aux besoins du peuplement forestier? D'après Ph. DUCHAUFOUR (1956), ces besoins sont beaucoup plus faibles que ceux des végétaux cultivés, et le puissant pouvoir de rajeunissement de ces sols intervient pour reconstituer les réserves épuisées.

Les sols cultivés reposant sur complexe sont également pauvres en P_2O_5 assimilable, mais leur taux moyen = 0,11 p. 100,4 fois supérieur à ceux des sols anatexitiques, est l'indice d'une rétrogradation moins accusée. Cette valeur s'explique par la moindre acidité du milieu (pH = 5,88) qui limite dans une certaine mesure la constitution des phosphates de fer et d'alumine insolubles, mais aussi par l'apport régulier effectué par les praticiens d'acide phosphorique minéral contenu dans les engrais, et des fumures organiques déterminant la création d'humo-phosphates, composés de choix pour les végétaux. De plus ces matières organiques peuvent aussi solubiliser les phosphates de fer.

Dans ce terroir très déficient en un aliment aussi précieux que P_2O_5, l'application des engrais phosphatés se révèle absolument indispensable et devra à l'avenir être continuée avec régularité.

Quant à la potasse échangeable, sa valeur moyenne 0,21 p. 100 est un peu plus élevée que celle des sols granitiques, car la proportion de biotite est plus forte dans les sols cristallophylliens, pourvus par ailleurs d'argiles illitiques. Mais dans cette région du Morvan-Nord, une récolte rémunératrice ne saurait se concevoir sans l'adjonction d'une fumure potassique en équilibre avec la fumure phosphatée, les exigences des plantes cultivées l'emportant sur les disponibilités des sols en cet élément.

E. — Comparaison entre les sols d'origines granitique et cristallophyllienne du Morvan-Nord et conclusion à leur étude.

La synthèse des résultats analytiques met en lumière les analogies et les différences qui rapprochent et opposent les sols granitiques et les sols cristallophylliens. Si nous limitons notre comparaison aux sols cultivés — la seule valable —, nous trouvons dans les deux cas des Rankers d'érosion, de profil AC, dont le pouvoir de rajeunissement est également accusé.

Mais les sols sur complexe se distinguent des types granitiques par les caractères essentiels suivants :

1° — Profondeur plus grande.

2° — Proportion moyenne en terre fine plus élevée (de 10 p. 100 environ).

3° — Texture physique sensiblement meilleure, grâce à une répartition mieux équilibrée des effectifs granulométriques.

4° — Meilleure qualité des argiles, eu égard à la présence d'illites.

5° — Teneur en matières organiques passant de 3 à 3,5 p. 100.

6° — Teneur en K_2O échangeable, très légèrement supérieure (0,17 p. 100 contre 0,21 p. 100).

Il y a interférence de ces différents facteurs, dont la résultante détermine un type de sol plus favorable aux cultures, et doué d'une potentialité de production qui l'emporte sur celle des sols granitiques des environs de Lormes, et même des autres sols du Morvan depuis Chastellux jusqu'à Luzy, à l'extrémité sud de la Nièvre.

Ces sols établis sur complexe, dans la zone Empury-Chastellux, résultent semble-t-il, d'une heureuse symbiose entre les constituants physico-chimiques apportés par chacun des deux socles géologiques fondamentaux. Les types reposant sur anatexique pure sont — avons-nous signalé — le domaine presque exclusif de la forêt, moins exigeante que les plantes cultivées qui prospéreraient avec difficulté dans un milieu de pH = 5, où la vie microbienne, notamment des bactéries et des actinomycètes, est alors notablement ralentie. Très mal pourvus en acide phosphorique assimilable, leur texture physique est par contre assez bonne, et lorsque les éléments fins (argile + limon) dépassent 40 p. 100, il y a une légère tendance à la compacité du sol. Un apport filonien de nature granitique vient dans une certaine mesure corriger ces insuffisances, tout en profitant lui-même d'une amélioration de ses propriétés physiques. L'argile cristallophyllienne accroît la capacité de rétention de l'eau de la partie éruptive, mieux alimentée ainsi en réserves hydriques, la fraction de ces sables grossiers diminue, ralentissant la perméabilité. Sa structure est améliorée, et le pourcentage de K_2O échangeable s'élève légèrement.

En revanche, à l'actif de la partie d'origine éruptive des sols sur complexe, il faut surtout mentionner l'apport d'un milieu à acidité moins élevée, plus apte au développement de la flore microbienne et mieux pourvu en acide phosphorique ; il y a bien association et interprétation de deux milieux car chacun d'eux profite à l'autre.

Nous rejoignons donc le point de vue des agriculteurs qui ont depuis longtemps forgé leur opinion à la lumière des résultats culturaux obtenus

sur ce mélange cristallophyllien et éruptif, opinion plus assise que celle qui découle de cette étude, puisqu'elle s'appuie sur le meilleur argument : la réponse des plantes.

Qu'il me soit permis, en terminant, d'insister sur la nécessité des travaux de base en matière de recherches sur les sols, et de marquer l'intime liaison existant entre la Géologie pure et la Pédologie : ces deux disciplines vivent en union étroite, et il ne faut jamais les dissocier au risque d'être privés de renseignements fondamentaux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AGAFONOFF (V.). — *a*) Sols types de Tunisie. Étude minéralogique du sol. 3e Congrès International de la Science du sol à Oxford. — Vol. III, p. 74-78 (1936). *b*) Les étapes des analyses chimiques et minéralogiques du sol. *Bull. A. F. E. S.*, V, p. 125-133, (1939).

ANDRÉ (J.), DEJOU (J.), SAJOT (M.). — Contribution à l'étude de certains phénomènes de transport ayant effecté les arènes granitiques du Morvan-Nord. Cahiers du Laboratoire de Géographie de la Faculté des Lettres de Dijon nº 1 et 2, p. 2-32 (janv.-déc. 1956).

ANDREATA. — Sur l'altérabilité des minéraux des roches. Importance du rôle de la structure cristalline dans le déroulement de ces processus (en italien). B. A. C. N. R. S., nº 12-40-85, p. 245 (1951).

ARSANDAUX (H.). — Contribution à l'étude des latérites C. R. A. S.,t. CXLIX (p. 682-685), (26 oct. 1909). — *b*) Contribution à l'étude des formations latériques C. R. A. S. t. CXLIX (p. 1082), (6 déc. 1909).

BARSHAD (I.). — Vermiculite and its relation to biotite as revealed by base exchange relations, X rays analyses, differentiel thermal curves, and water content. *American Minéralogist*, vol. 33 (nov.-déc. 1948).

BASTIN (E.). — Chemical composition as a criterion in identifying metamorphosed sediments. *Journ. Géol.*, **17**, p. 444-472, 1909.

BASTISSE (E.). — Contribution à la détermination du type minéralogique des argiles des sédiments. Sols naturels en place et terres de culture. Premier mémoire, *Ann. Agro.* 17e année, nº 3, p. 398-453 (mai-juin 1947).

BERTHOIS (L.). — Recherches sur les minéraux lourds des granites de la partie orientale du Massif Armoricain (Thèse). *Bull. Soc. Géol. et Min. de Bretagne* (1935).

BERTHOIS (L.). — Sur une forme particulière de l'horizon illuvial dans les sols podzoliques sur arène granitique. C. R. A. S., **228**, nº 12, p. 1042-1043 (1949).

BILLY (G.). — Étude des courbes normales de dispersion. Éléments de statistique à l'usage des naturalistes. C. D. U. Paris (1954).

BIROT (P.). — Résultats de quelques expériences sur la désagrégation des roches cristallines. C. R. A. S., **225**, nº 17 (25 oct. 1947).

BIROT (P.). — Essai sur quelques problèmes de morphologie générale. Instituto para a alta cultura. Centro des estudos geographicos, Lisbonne (1949).

BIROT (P.), — Notes sur le problème de la désagrégation des roches cristallines. *Revue de Géomorphologie dynamique*, p. 271-276 (1950).

BIROT (P.). — Désagrégation des roches cristallines sous l'action des sels. C. R. A. S., **238**, nº 10, p. 1145-6 (8 mars 1954).

BLANCK (E.) et RIESER. — Uber die chemische Veränderung des Granits unter Moorbedeckung. *Chemie der Erde*, p. 8-15 (1926).

BLANCK (E.). — Handbuch der Bodenlehre. Die Verwitterungslehre und ihre klimatologischen Grundlagen. Tome II. Berlin (1929).

BLANCK (E.) et GIESECKE. — Uber Verwitterung und Bodenbildung des Granits auf Spitzbergen. *Géol. Rund.*, p. 143-147 (1932).

BLANCK (E.) et THEMLITZ. — Recherches comparatives sur l'évolution pédologique des roches dans des conditions climatiques variées. *Chemie der Erde*, V. IX, p. 529 (1935).

BOINEAU (R.) et NICAISE (J.). — Les schistes cristallins du plateau d'Aigurande au sud de la Châtre et de Chateaumeillant (D. G. P. Clermont, juin 1950). *Rev. Sc. Nat. d'Auvergne*, **16**, Fasc. 1-2-3-4 (1950).

BONIFAY (E.). — Le rôle du gel dans la fissuration des galets de roche calcaire. C. R. A. S., **240**, n° 8, p. 986-989 (21 fév. 1955).

BOUT (P.). — Les dépôts de pente anciens du Velay. B. S. G. F. 5e série, XIX, p. 15 (1949).

BRAJNIKOV (B.). — Sur les associations des minéraux lourds dans quelques formations post-crétacées du Bassin Parisien (au sud de la Loire). C. R. A. S., **215**, p. 491-492 (1942).

BURRI (C.) et NIGGLI (P.). — Die jungen Eruptivgesteine des mediterranen Orogens Bd. P. Publ. Vulkaninstitut Immanuel Friedländer, 3, 654 p. (1945).

Cahiers du Laboratoire de Géographie de la Faculté des Lettres de Dijon. — Études granulométriques. Établissement et traitement statistique des courbes (Janv. 1955).

CAILLÈRE (Mlle S.). — Action de la chaleur sur les minéraux des argiles. Extrait de Transactions of the international congress of Soil Science. Vol. III, p. 54-62, Amsterdam (1950).

CAILLÈRE (Mlle S.) et HÉNIN (S.). — Application de l'analyse thermique différentielle à l'étude des argiles des sols. *Ann. Agro.*, 17e année, n° 1, p. 23 à 72 (janv.-févr. 1947).

CAILLÈRE (MlleS et HÉNIN (S.). — Transformation of minerals of the Montmorillonite family into 10 Å micas. Experimental formation of chlorites from montmorillonite. *Miner. Magazine*, Londres, Vol. XXVIII, n°205, p. 606-611 et 612-620 (juin 1949).

CAILLÈRE (Mlle S.) et HÉNIN (S.). — L'altération des roches gabbroïques en Guyane. C. R. A. S., **232**, p. 1314-1316 (28 m rs 1951).

CAILLÈRE (Mlle S.) et HÉNIN (S.). — Sur la signification desr ésultats de l'analyse thermique différentielle. Extrait de la Revue « Verre et Silicates industriels », 11, rue du Gentilhomme, Bruxelles.

CAILLEUX (A.) et TRICART (J.). — Le problème de la classification des faits géomorphologiques. *Ann. de Géographie*, n° 349, LXV année, p. 162-186 (mai-juin 1956).

CARROLL (D.). — étude minéralogique de quelques sols de Denmark (Australie de l'Ouest). Soils *Sc.*, **60**, p. 413-426 (1946). Résumé dans *Ann. Agro*, p. 376 (1945).

CAYEUX (L.). — Constitution de la terre arable. Du rôle de l'analyse minéralogique dans l'analyse des terres. *Revue de Viticulture*, I, p. 457-490 et 520 (1905).

CAYEUX (L.). — État de conservation des minéraux dans la terre arable. C. R. A. S., **140**, p. 1270 (1905).

CHAUTARD (J.) et LEMOINE (P.). — *(a* Décomposition latéritique. C. R. A. S., CXLVI, p. 239-242 (1908). *b)* Sur le phénomène de latéritisation. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (4), VIII, p. 35-38 (1908).

CIRY (R.). — Contribution à l'étude des influences périglaciaires en Bourgogne. *Bull. Soc. Archéol.*, Beaune, tome spécial du Centenaire. Compte rendu du XXIIe Congrès de l'Assoc. bourguign. des Soc. Savantes, 1er fascicule, p. 3-6 (1951).

COCHET (A.). — La série cristallophyllienne et les granites de la partie N. O. du Morvan. Diplôme Géologue Pétrographe, Clermont (1953).

COLLIER (D.). — Composition minéralo-pétrographique et coloration des sols dans le Puy-de-Dôme. *Ann. Agro.* 2e trimestre (1944).

COLLIER (D.). — Contribution à l'étude des terres noires de la Limagne d'Auvergne. Constitution et génèse. Thèse. Paris, Dunod (1949).

COLLIER (D.). — Contribution à l'étude de l'altération des granites et de l'évolution des sols sur les plateaux granitiques de l'Auvergne. *Bull. Ass. Franc. pour l'étude du sol*, p. 1-12 (juillet 1951).

COLLIER (D.). — Application de la fusion au bisulfate de potasse à certaines recherches pédologiques. C. R. A. S., **236**, n° 3, p. 321 (19 janv. 1953).

COLLIER (D.) et GACHON (L.). — Essai de cartographie à grande échelle d'une commune de la Limagne argilo-calcaire : Lemp des. Note dactylographiée. Station Agronomique, Clermont (1955).

CORRENS (C. W.). — La décomposition chimique des silicates au Laboratoire et dans le sol. B. S. I. N. R. A., p. 3 (8 sept. 1952).

DAUBRÉE (A.). — Étude synthétique de géologie expérimentale. Paris, Dunod (1879).

DELAGE, LAGATU (H.), DUMONT. — Sur les résultats obtenus par l'observation des terres arables en plaques minces. C. R. A. S., **139**, p. 1.233, **140**, p. 1.555-1.557 (1904-1905).

DELAGE, LAGATU (H.), DUMONT. — *Annales de l'école. Nat. Agri. Montpellier*, IV, p. 93 et p. 200-229 (1905).

DEMOLON (A.) et BASTISSE (E.). — Genèse des colloïdes argileux dans l'altération du granite en cases lysimétriques. *Ann. Agro.*, nº 6, p. 803-810 (nov.-déc. 1936).

DEMOLON (A.). — La Dynamique des Sols. Tome I. 3e édition (p. 117 à 139). Paris, Dunod (1944).

DEMOLON (A.) et BASTISSE (E.). — Observation sur les premiers stades de l'altération spontanée d'un granite et la genèse des colloïdes argileux. C. R. A. S., **223**, p. 115-118 (1946).

DERRUAU (M.). — Les caractères différentiels des roches du socle dans l'ouest et le sud-ouest du Massif Central Français. Publications de la Faculté des Lettres de l'Université de Clermont-Ferrand. Fasc. 6. — Institut de Géographie, Paris, 51 p. (1952).

DUCHAUFOUR (Ph.). — Pédologie. Applications forestières et agricoles. École Nat. des Eaux et Forêts, Nancy (1956).

EHRART (H.). — Traité de Pédologie. **1**. Institut Pédologique, Strasbourg (1935).

FRANC DE FERRIÈRE. — Les sols de France et de l'Union Française. Services Agro. de la Société commerciale des Potasses d'Alsace, Mulhouse (1957).

VAN KEYMEULEN (Jan) et WILLY DEKEYSER. — C. R. A. S., **236**, p. 1367 (1953).

VAN KEYMEULEN (Jan). — L'altération des minéraux micacés par CO_2. C. R. A. S., **242**, nº 5, p. 651-653 (30 janv. 1956).

GRAHAM. — Les feldspaths plagioclases comme indices d'altération du sol. B. A. C. N. R. S., nº 12-40-178, p. 245 (1951).

GUILLIEN (Y.). — La couverture végétale de l'Europe pléistocène. Ann. de Géographie nº 344. — LXIVe année, p. 241-276 avec 2 planches hors texte et 9 figures dans le texte (juillet-août 1955).

GUINIER. — Ray. Crystallographic Technology, Londres (1952).

HENDRICKS et NEWLANDS. — *Journ. Agr. Sc.*, Vol. XIII, p. 1-17 et t. V, p. 93-110 (1933).

HÉNIN (S.). — Altération expérimentale d'un schiste ; comparaison avec un granite. C. R. A. S., **237**, p. 1437 (1953).

HÉNIN (S.) et ROBICHET (O.). — Sur les conditions de formation des minéraux argileux par voie expérimentale, à basse température. C. R. A. S., **236**, nº 5, p. 517 (1953).

HÉNIN (S.) et PEDRO (G.). — Mise en évidence d'un effet de dislocation du granite à biotite par traitement à H_2O_2. C. R. A. S., **245**, p. 1451-1453, nº 17 (21 oct. 1957).

HIRNE (G.) et LAMY (Ch.). — Aperçu d'ensemble sur les argiles céramiques. Identification des argiles par l'analyse thermique. *Bull. Soc. Franç. de Céramique*, nº 10 (janv.-mars 1951).

KLOOS (H.). — Einführung in die Geologie, p. 82-101 et p. 214-230. Von Gebrüder Bornträger. Berlin (1939).

KORZHINSKY (D. S.). — Liquid inclusions as the cause of imaginary pelitisation of feldspaths. C. R. A. Sc. U. R. S. S., 29, nº 2, p. 112-114 (1940).

KRUMBEIN-PETITJOHN. — Manual of Sedimentary Petrography, New-York (1938).

LACROIX (A.). — *a* Les latérites de la Guinée et les produits d'altération qui leur sont associés. *Nouvelles Arch. Museum*, **5**, p. 255-356 (1913). *b*) *Minéralogie de Madagascar*, **1** (p. 24) (1922). Librairie maritime et coloniale, Paris. *c*) *Minéralogie de Madagascar*, III, (p. 92 à 106) (1923).

LAPPARENT (J. DE). — Étude comparative de quelques porphyroïdes Françaises. Thèse. *Bull. de la Soc. Franc. de Minéralogie*, **32**, p. 174-304 (1909).

LEIGH FERMOR (M.). — What is laterite. *Geol. Magaz.*, VIII, p. 454-507-556 (1911).

MAZENOT (G.). — Recherches géologiques sur les éboulis du Mont d'Or Lyonnais. *Bulletin Mensuel de la Soc. Linnéenne de Lyon*, n° 2, p. 24-30 (fév. 1957).

MERIAUX (Mme S.). — Contribution à l'étude de l'analyse granulométrique (1re thèse). *Institut Nat. de la Recherche Agronomique*, Série A, n° 590, 118 p. Paris (1953).

MERIAUX (Mme S.). — Étude expérimentale de l'action d'un calcaire broyé sur un sol du Morvan. *C. R. de l'Ac. d'Agriculture de France*, n° 11, p. 619 (juin 1957).

MERRILL. — Desintegration of the granitic rocks of the District of Columbia. *Bull. Géol. Soc. Amer.*, p. 325 (1895).

MICHEL (R.). — Contribution à l'étude pétrographique des péperites et du volcanisme tertiaire de la Grande Limagne. *Mém. de la Soc. d'Hist. Nat. d'Auvergne*, n° 5, 140 p., Clermont (1953).

MICHEL-LÉVY (A.). — Aperçu général sur la constitution du Morvan. B. S. G. F. 3e série VII (p. 758-766) (1879 *a*).

MICHEL-LÉVY (A.). — Note sur la formation gneissique du Morvan et comparaison avec quelques autres régions de même nature. B. S. G. F. 3e série VII, p. 858 (1879).

MICHEL-LÉVY (A.). — Les terrains primaires du Morvan et de la Loire. Thèse, Paris (1908).

MIHARA. — Forme de l'altération des feldspaths dans les arènes granitiques des Vosges. C. R. S. A., **198**, p. 955-956 (1934).

MILLOT (G.). — Relation entre la constitution et la genèse des roches sédimentaires argileuses (thèse). Extrait de Géologie appliquée et prospection minière de Nancy, n° 2-3-4. tome II, 371 p. + 7 planches hors texte (1949).

MORROW-CAMPBELL (M.). — Laterite its structure and minerals. *Mining. Magaz*, p. 67-120-171-220 (1917).

MUNIER (P.) et RIVIÈRE (A.). — Contribution à l'étude des argiles utilisées en céramique. Fasc. 1 : Exposé d'ensemble. Méthode d'étude et d'identification. Publication du Centre National d'études et de recherches céramiques. 111 p., 19 figures, 19 planches, Paris (1946).

NIGGLI (P.). — Uber Molekularnormen zur Gesteinsberchnung. *Schw. Min. Petr. Mitt.*, XVI, n° 2, p. 295 (1936).

NOVAK (Y.). — La composition minéralogique des fractions sableuses (Die mineralogische Zusammensetzung der Sandfraktionen). C. R. de la 1re Commission de l'A. T. S. S., vol. A. Banger-Wales, p. 30-37. Résumé publié dans *Ann. Agro.*, n° 1, p. 133-134 (janv.-fév. 1939).

ORCEL (J.). — *a*) Recherches sur la composition chimique des chlorites. Thèse 375 p. *Bull. Soc. Franç. de Minéralogie* t. 50 (1927). *b*) VIIe Congrès international des Mines. Metallurgie. Géol. appliquée. *Section géol. appl.*, **1**, Paris (1935).

PEDRO (G.). — Nouvelles recherches sur l'influence des sels dans la désagrégation des roches. C. R. A. S., **244**, n° 23, p. 2822-2824 (3 juin 1957).

PEDRO (G.). — Mécanisme de la désagrégation du granite et de la lave de Volvic sous l'influence de sels de cristallisation. C. R. A. S., **245**, n° 3, p. 333-335 (17 juillet 1957).

RAT (P.). — Observations sur la solifluction dans les dépôts de pente du Châtillonnais. C. R. du XXIVe Congrès de l'Assoc. Bourguign. des Soc. Savantes, Dijon, 3 p. (1953).
RINNE (F.). — La Science des Roches. 3e édition, Lamare., Paris (1949).
RIVIÈRE (A.). — Progrès récents dans la connaissance des minéraux argileux Signification céramique et géologique. *Bull. de la Soc. Française de Céramique*, nº 10 (janv.-mars 1951).
RIVIÈRE (A.). — Les argiles complexes kaolino-illitiques. *Rev. de la Soc. Française de Céramique*, nº 13 (oct.-déc. 1951).
ROQUES (M.). — Les schistes cristallins de la partie sud-ouest du Massif Central Français. Mémoire pour servir à l'explication de la carte géologique de France, 527 p. (1941).
ROUGER (C.). — Méthodes d'analyse des roches et des minéraux silicatés. Travaux du Laboratoire de Géologie et Minéralogie de Clermont. Série Documentation nº 3, 31 p. (1954).
RUDEL (A.). — Sur quelques phénomènes périglaciaires en Limagne. *Rev. Sciences Nat. d'Auvergne*. Fasc. 3-4 (1949).
RUDEL (A.) et LEMEE (G.). — Würmien et Post-Würmien en Limagne de Cler mont. *Rev. Sciences Nat. d'Auvergne*. Fasc. 1-2 vol. 21, p. 27-37 (1955).
RUELLAN (F.). — La décomposition et la désagrégation du granite à biotite du Japon et en Corée et les formes du modelé qui en résultent. *C. R. Congr. int. Géogr.*, Paris (1931).
SIR THOMAS HOLLAND. — *Géol. Magaz.*, X (1903).
TAMM (O.). — *Arkiv. Kem-Mineral*, Géol., nº 11, p. 1-27 (1934).
THIEBAULT (L.). — Contribution à l'étude des sédiments argilo-calcaires du Bassin de Paris. Thèse, Nancy (1925).
TRICART (J.). — Le modelé périglaciaire. C. D. U. Paris (1950).
TRICART (J.). — Rapports de la Commission de Géomorphologie périglaciaire de l'U. G. I. Congrès de Rio-de-Janeiro (1956).
VAN DER VLEK et FLORSCHUTZ (F.). — The paleontological base of the subdivision of the pleistocène in the Nederlands (1950).
VATAN (A.). — La sédimentation continentale tertiaire dans le Bassin de Paris méridional. Éditions toulousaines de l'Ingénieur. Toulouse, 8, rue du Poids de l'Huile. Thèse (1947).
VERNADSKY (W.). —C. R. A. S., t. CLXXV, p. 450 (1922).
WAEGEMANS (G.). — Introduction à l'étude de la latéritisation et des latérites du Centre Africain. *Bull. Agric.* Congo Belge, 42, 13-56 (1951-1952). Résumé dans *Ann. Agro.*, Série A, 3e année, nº 1, p. 133.
WALLACH (R.). — Analyse thermique des argiles. C. R. A. S., **137**, p. 48 (1913)
WATSON. *Bull. Geol. America* (1901).
ZEMIATCHENSKY. — *Trans. Dokutchaev. Inst.*, nº 8, p. 1-42 (1933).

Le Directeur-Gérant : B. LACLAVIÈRE.